



Daniel Bruno de Oliveira

INTERPRETAÇÃO RADARGRÁFICA APLICADA A MODELO SRTM

SOMBREADO:

Mapa Lito-Textural de uma Área em Carajás

Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2009



UFRJ

Daniel Bruno de Oliveira

Interpretação Radargráfica Aplicada a Modelo SRTM Sombreado:

Mapa Lito - Textural de uma Área em Carajás

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

José Carlos Sicoli Seoane

Paulo Roberto Alves dos Santos

Rio de Janeiro

Julho - 2009

Daniel, Bruno de Oliveira

Interpretação Radargráfica Aplicada a Modelo SRTM Sombreado: Mapa Lito-Textural de uma Área em Carajás / Daniel Bruno de Oliveira - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2009.

xx, 59 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2009.

Orientador(es): José Carlos Sicoli Seoane, Paulo Roberto Alves dos Santos, 1. Geologia. 2. Geologia Regional – Trabalho de Conclusão de Curso. I. José Carlos Sicoli Seoane. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Interpretação Radargráfica Aplicada a Modelo SRTM Sombreado: Mapa Lito-Textural de uma Área em Carajás.

Daniel Bruno de Oliveira

INTERPRETAÇÃO RADARGRÁFICA APLICADA A MODELO SRTM SOMBREADO:

Mapa Lito-Textural de uma Área em Carajás

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

José Carlos Sicoli Seoane
Paulo Roberto Alves dos Santos

Aprovada em:

Por:

Orientador: José Carlos Sicoli Seoane (UFRJ)

Paulo Roberto Alves dos Santos (IBGE)

Claudio Gerheim Porto (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2009

A Maria Sônia Bruno da Silva, minha mãe e Rute José Casado de Lima, namorada. Também a todos os amigos feitos durante o curso de geologia da UFRJ e aos professores do instituto que orientaram minha formação profissional, José Carlos Sicoli Seoane, Claudio Limeira e Claudio Porto.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Carlos Sicoli Seoane por todo o conhecimento, discussões, materiais bibliográficos, dados cedidos e pelo bom tempo de dedicação na elaboração deste trabalho.

Ao doutorando Paulo Roberto Alves por todos os conhecimentos, discussões, materiais bibliográficos e dados cedidos para elaboração deste trabalho.

Ao geólogo Thiago Piacentini pelas opiniões e críticas no texto.

A Rute José Casado de Lima pela revisão do texto.

RESUMO

OLIVEIRA, Daniel Bruno. **Interpretação Radargráfica Aplicada a Modelo SRTM Sombreado**: Mapa Lito-Textural de uma Área em Carajás. 2009. xx, 58p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Na geologia, a interpretação do modelo SRTM é uma importante etapa que antecede qualquer trabalho de campo. Dessa interpretação obtêm-se informações referentes à morfologia de terreno, padrão de drenagens e geologia. As interpretações de cunho geológico podem até mesmo predizer tipos litológicos e estruturas do terreno. Esses dados podem ser realçados e interpretados a partir da imagem de sombreado do modelo SRTM, também conhecido como *hillshade*. Esta se trata de uma imagem equivalente a uma de radar a qual destaca, através dos níveis de cinza, informações morfológicas do terreno, sendo assim, esta imagem é passível de ser interpretada da mesma forma que se interpreta uma imagem de radar. A proposta desse trabalho é usar as técnicas de interpretação radargráficas para entender e retirar informações geológicas da imagem de sombreado do modelo SRTM da área de estudo. Os dados produzidos por este trabalho indicam que técnicas de interpretação de imagem de radar e fotogeologia puderam ser adequadamente utilizadas na obtenção de dados litológicos e estruturais da área de estudo, em escala compatível com 1:50.000. A interpretação da imagem *hillshade* pode ser feita em um curto intervalo de tempo e com dados encontrados gratuitamente na internet, mas isso não dispensa confirmações com trabalhos de campo. Recomenda-se ainda, a utilização de outras imagens no espectro ótico em alta resolução (ex.: imagem Ikonos) para uma interpretação com escalas mais precisas.

Palavras - chave: SRTM; Sombreamento; Carajás.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Daniel Bruno. **Radargraphic Interpretation Applied to Hillshaded SRTM Model: Litotextural Map of an Area in Carajás.** 2009. xx, 58p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

In geological works the interpretation of SRTM models is an important step before any field work. From this interpretation is possible to obtain informations about geomorphology, drainage pattern and geology. The geological interpretation may even predict lithological types and structures of the terrain. These data can be read from the shading of the SRTM model, also known as Hillshade. This shade is an image equivalent to a radar image that highlights, through the digital levels, morphological details of the terrain, so this picture is likely to be interpreted by the same way that one interprets the radar picture. The purpose of this work is to use the techniques of interpretation to understand and obtain radargraphic geological information from the image of the SRTM model shading of the study area. The data produced by this study indicate that techniques of the radar and photogeologic interpretation could be properly used to obtain lithological and structural data of the study area, consistent with scale 1:50,000. The interpretation of the Hillshade image can be done in a short time and with data found on the Internet, but also needs confirmations with field work. It is also recommended the use of other images in high resolution (e.g. Ikonos image) in the optical spectrum to be interpreted with more precise scales.

Key-Words: SRTM; Hillshade; Carajás

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização da área (DNIT)	1
Figura 2.1: Aquisição de um par de imagens SAR para gerar uma imagem interferométrica. Onde B – Linha de Base; A1 e A2 – Antenas; r e $r + \Delta r$ – distância do ponto imageado. (Mura, 2000).	3
Figura 2.2: Aquisição de um par de imagens SAR por uma passada a partir de um meio com duas antenas. Onde B – Linha de Base; A1 e A2 – Antenas; r e $r + \Delta r$ – distância do ponto imageado (Mura, 2000)	4
Figura 2.3: Recobrimento SRTM (Santos, 2005 <i>apud</i> HEADY & LITTLE, 2003)	4
Figura 2.4: Sistema SAR utilizado na missão SRTM (Santos, 2005 <i>apud</i> RABUS <i>et al.</i> , 2002)	5
Figura 2.5: Faixa coberta pela órbita da missão SRTM (Farr <i>et al.</i> , 2007)	5
Figura 2.6: Modelo esquemático representando a organização dos modelos da SRTM. A - Nos Estados Unidos (resolução de 30m); B – Restante da Terra (resolução de 90m). Ponto vermelho representa a identificação do modelo.	6
Figura 2.7: Desenho esquemático mostrando a interpolação pelo vizinho mais próximo. (modificado de INPE)..	9
Figura 2.8: Desenho esquemático mostrando a interpolação bilinear. O valor obtido do pixel interpolado trata-se da média ponderada dos pontos E e F, o qual é transferido para a posição X produzindo um efeito de suavização devido a operação de média. (modificado de INPE)	10
Figura 2.9: Interpolação por convolução cúbica. Introduz novos valores aos pixels (altera parâmetros estatísticos), produzindo uma imagem com aparência mais natural (modificado de INPE)	11
Figura 2.10: Desenho esquemático mostrando o princípio de engenharia para confecção de uma linha curva e suave.	12
Figura 2.11: Desenho esquemático exemplificando o princípio da interpolação cubic spline.....	14
Figura 2.12: Desenho esquemático mostrando ângulos de posicionamento da iluminação do sombreado e suas respectivas orientações de estruturas realçadas.	16
Figura 2.13: Texturas radargráficas (Lima, 1995)	18
Figura 2.14: Tipos comuns de topos encontrados em imagens de radar. De (e) até h observa-se topos agudos formando cristas. Cristas lineares podem ser melhor observadas em h. O termo pendente trata-se da encosta dos morros, porém essa característica não foi utilizada para esse trabalho. (Lima, 1995)	20
Figura 3.1: Principais províncias do Cráton Amazonas na América do Sul. Área de estudo em vermelho. Modificado de Santos <i>et al.</i> (2002).	23
Figura 3.2: Mapa geológico-estrutural abrangendo porção oeste adjacente à área de estudo. Observar as subdivisões do Cinturão Cisalhamento Itacaiúnas : S.T Cinzento e S.T Carajás. Modificado de Rosière <i>et al.</i> (2006).	24
Figura 3.3: Mapa geológico da Província Mineral de Carajás e terrenos adjacentes (extraído de Bizzi <i>et al.</i> , 2001), com resolução na escala 1:2.500.000. Consultar sistema de informações geográficas (SIG, Seoane e Baars 2002) para detalhes litoestratigráficos e para legenda, Bizzi <i>et al.</i> (2001).....	25
Figura 3.4: Mapa geológico da área de estudo, recorte do mapa produzido por Lobato <i>et al.</i> (2002)	29

Figura 3.5: Esquema geocronológico das principais unidades lito-estratigráficas da Província Mineral Carajás (Lobato <i>et al.</i> , 2002)	30
Figura 4.1a: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em sombreamento de 45º.....	32
Figura 4.1b: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em sombreamento de 315º.....	33
Figura 4.1c: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em feições de drenagem.....	34
Figura 4.2: Imagem de sombreamento a azimuth de 45º (principal direção estrutural), gerada a partir de modelo SRTM. Traços em vermelho indicam contatos entre quebras de morfologia de relevo e textura.	37
Figura 4.3: Mapa de unidades texturais (ID - Descrição).....	38
Figura 5.1: Mapa geológico Lobato <i>et al.</i> (2002) integrado em SIG com mapa de limites das unidades texturais.	42

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 4.1: Variedade de texturas descritas sobre o modelo SRTM da área.....	39
Quadro 5.1: Associação litologia-textura	41

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
Resumo.....	vii
Abstract	viii
Lista de figuras	ix
Lista de Tabelas e Quadros	xi
Sumário	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Objetivo</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Localização da Área</i>	<i>1</i>
2 Materiais e Métodos	2
2.1 <i>Conceitos Básicos sobre SRTM.....</i>	<i>2</i>
2.2 <i>Outras Especificações</i>	<i>6</i>
2.2.1 <i>Versões.....</i>	<i>6</i>
2.2.2 <i>Reamostragem.....</i>	<i>8</i>
2.3 <i>Sombreamento e Técnicas de Realce de Estruturas e Interpretação de Imagem de DEM Sombreado do SRTM.....</i>	<i>15</i>
2.4 <i>Textura no modelo SRTM sombreado.....</i>	<i>16</i>
2.4.1 <i>Interpretação Litológica por textura.....</i>	<i>20</i>
3 Contexto Geológico	22
3.1 <i>Contexto geológico regional</i>	<i>22</i>
3.2 <i>Geologia Local</i>	<i>24</i>
4 Resultados	31
4.1 <i>Mapa de Lineamentos</i>	<i>31</i>
4.2 <i>Mapa Textural</i>	<i>34</i>
5 DISCUSSÃO.....	40
5.1 <i>Integração de dados em SIG: Mapa-Litotextural.....</i>	<i>40</i>
5.2 <i>Ambigüidades</i>	<i>43</i>
6 Conclusão e Recomendações	44
Referências bibliográficas.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal a geração de um mapa lito-textural, caracterizando os diferentes padrões texturais, feições geomorfológicas associadas à padrões litológicos e será desenvolvido com imagens de sombreamento (*hillshade*) geradas a partir de modelo SRTM, aplicando-se técnicas de interpretação de imagens de radar.

Este trabalho tem como objetivo específico atender a demanda de mapas para suporte de campo de tese de doutorado do departamento de geologia da UFRJ.

1.2 Localização da Área

A área de estudo está localizada na região sudeste do estado do Pará abrangendo parte dos municípios de Parauapebas, Canaã dos Carajás, Curionópolis e com uma menor porção a norte no município de Marabá. As principais vias de acesso a área são as rodovias estaduais PA-275, PA-150 e a Ferrovia Carajás (fig. 1.1).

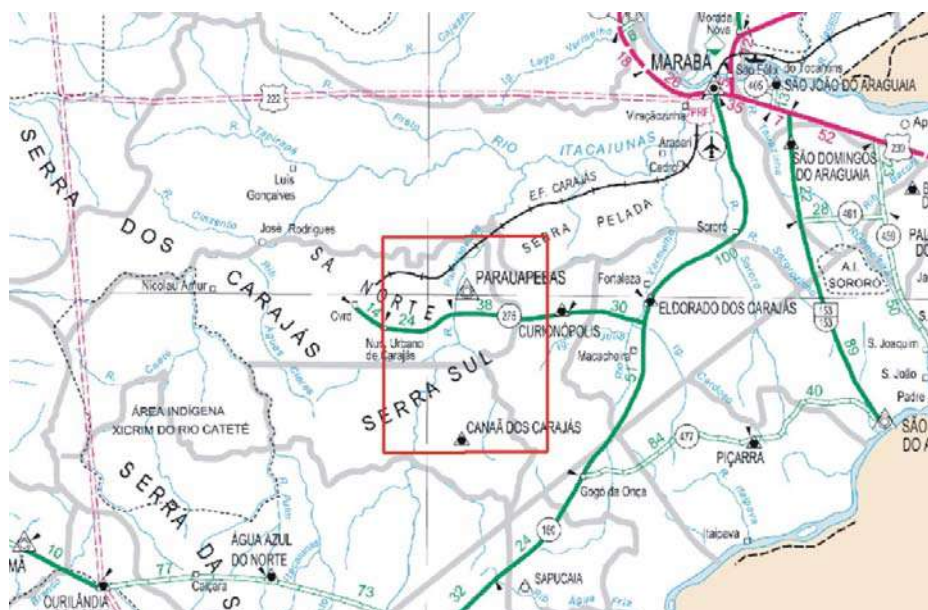


Figura 1.1: Mapa de localização da área (DNIT)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Conceitos Básicos sobre SRTM

A "*Shuttle Radar Topography Mission*" (SRTM) foi um projeto com uma associação da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), e as agências de pesquisas espaciais da Alemanha e Itália. Teve início em fevereiro do ano 2000 e teve como objetivo adquirir dados para produzir o mais completo modelo de elevação em alta resolução da Terra, cobrindo a faixa de latitude compreendida entre 60°N e 56°S (aproximadamente 80% da superfície da Terra). Para isso o ônibus espacial Endeavour foi enviado à órbita da Terra munido de antenas de radar de abertura sintética (SAR) duplas a fim de adquirir dados de radar interferométrico. Esses dados foram processados para criar um modelo digital de elevação com resolução de 1 arco-segundo (aproximadamente 30x30 m no Equador) e com erro altimétrico absoluto médio menor que 16 m e relativo de 10 m. É importante observar que o comprimento de onda do radar utilizado na missão SRTM não penetra em áreas densamente vegetadas, sendo portanto um modelo digital de elevação (*DEM*, sigla em inglês). Sendo assim os dados sensorizados nestas regiões são relativos à copas de árvores, prédios e outras construções e objetos sobre o terreno.

A interferometria SAR (Mura, 2000) trata da técnica que utiliza um par de imagens SAR para gerar uma terceira imagem denominada imagem interferométrica. O termo InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) é aplicado a essa técnica. Cada pixel da imagem InSAR, guarda informações referentes à fase interferométrica, ou seja, sobre a diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens SAR originais. A fase de cada pixel é função da elevação da superfície da Terra, isso permite a geração de modelos de elevação do terreno (*DEM*).

Antes do lançamento do ônibus espacial destinado a SRTM, os pesquisadores já contavam com dados de vários satélites carregando sistemas SAR, logo, o interesse na interferometria era grande, pois a partir de órbitas distintas podia-se obter um par de imagens SAR separados por uma linha de base (distância entre as órbitas) e obter assim uma imagem interferométrica (fig. 2.1).

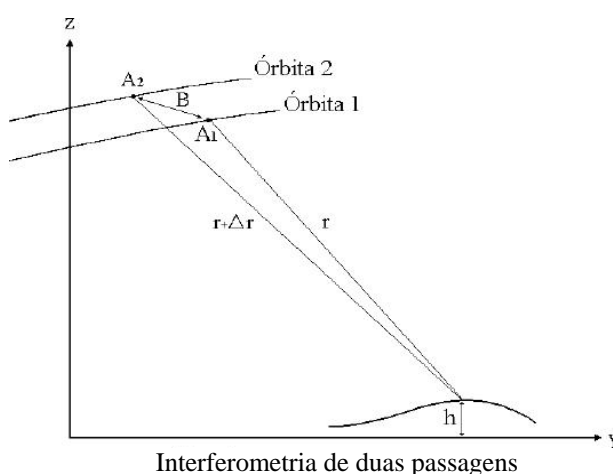


Figura 2.1: Aquisição de um par de imagens SAR para gerar uma imagem interferométrica. Onde B – Linha de Base; A1 e A2 – Antenas; r e $r + \Delta r$ – distância do ponto imageado. (Mura, 2000).

Esse tipo de técnica, contudo, demandava tempo, grande volume de processamento para corrigir erros de diferença de posicionamento do satélite entre as órbitas e efeitos de ruídos referentes às condições atmosféricas distintas entre as duas passagens.

Para solucionar esse problema foram desenvolvidos sistemas SAR com duas antenas distintas entre si. Isso garantia velocidade de aquisição dos dados, condições atmosféricas uniformes e a distância base fixa entre as antenas do radar (fig. 2.2).

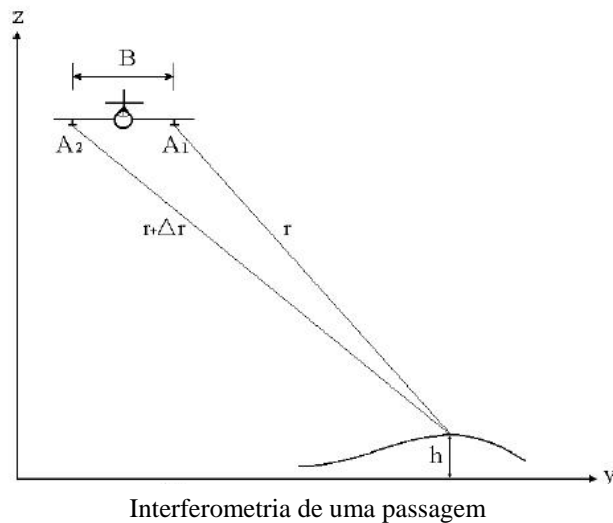


Figura 2.2: Aquisição de um par de imagens SAR por uma passada a partir de um meio com duas antenas. Onde B – Linha de Base; A1 e A2 – Antenas; r e $r + \Delta r$ – distância do ponto imageado (Mura, 2000)

O SRTM é o principal exemplo de uso de um SAR configurado para maximizar a aquisição de dados interferométricos. Foi o projeto pioneiro no uso de duas antenas de um sistema SAR em órbita, imageando toda a área proposta em 159 órbitas (fig. 2.3).

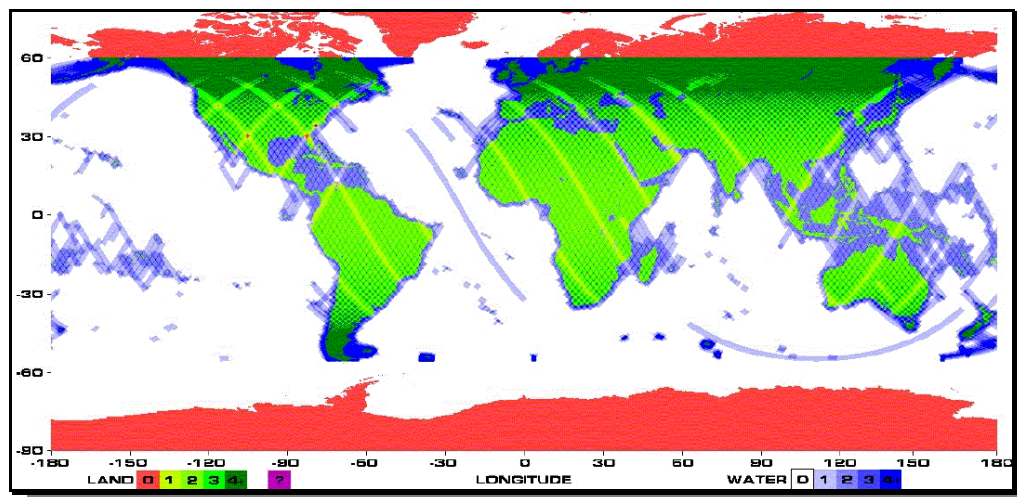


Figura 2.3: Recobrimento SRTM (HEADY & LITTLE, 2003 *apud* Santos, 2005)

O SRTM utilizou duas antenas SAR separadas por uma haste de 60 m, uma das antenas ficava no compartimento de carga do ônibus espacial (antena principal) e a

outra na extremidade da haste (antena suplementar). Ambas as antenas operavam tanto na banda-C (5,6 cm) como na banda-X (3,1 cm) (fig. 2.4).

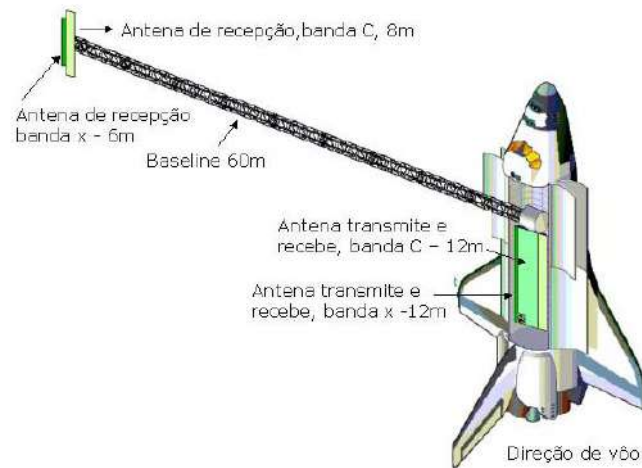


Figura 2.4: Sistema SAR utilizado na missão SRTM (RABUS *et al.*, 2002 *apud* Santos, 2005)

A antena principal era de recepção e transmissão enquanto que a antena suplementar era apenas de recepção de dados. Essa configuração proporcionava uma cobertura de 50 km por órbita na banda X o que não permitiria a aquisição de todos os dados no tempo previsto para a missão, por isso, utilizou-se também um SAR na banda C em conjunto, pois este opera numa faixa de imageamento de 225 km (fig. 2.5), sendo assim Endeavour (ônibus espacial da missão SRTM) pôde mapear a área-alvo com um total de 159 órbitas num prazo de 10 dias.

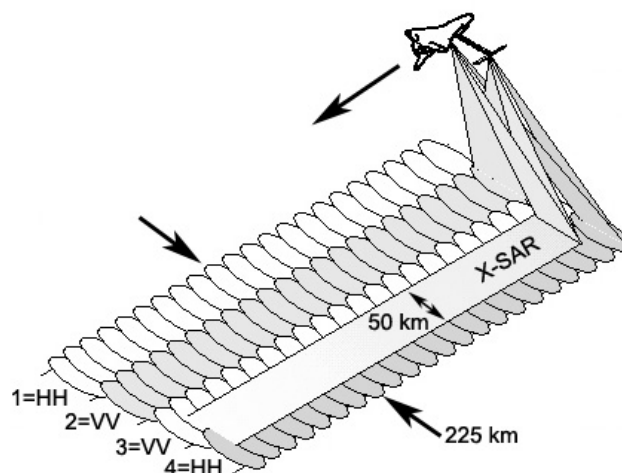


Figura 2.5: Faixa coberta pela órbita da missão SRTM (Farr *et al.*, 2007)

Os modelos da SRTM podem ser obtidos gratuitamente na internet acessando o site <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>, porém esses dados ainda contêm algumas áreas com vazios (áreas com falta de dados), discutidos no próximo subitem. O DEM utilizado neste trabalho, duas cenas SRTM complementares, foram obtidos através do site da *Consultative Group on International Agricultural Research* (CGIAR, <http://srtm.csi.cgiar.org/>), órgão de pesquisa internacional pioneiro em sistemas de informações geográficas e sensoriamento remoto, este foi responsável pelo aperfeiçoamento dos dados da SRTM, corrigindo as áreas de vazio e disponibilizando gratuitamente.

2.2 Outras Especificações

2.2.1 Versões

Os dados da Missão SRTM foram processados por continente nos supercomputadores do Jet Propulsion Laboratory (JPL). Foram mosaicados aproximadamente 15.000 Modelos Digitais de Elevação, e organizados no formato de 1° de latitude por 1° de longitude. A identificação dos modelos é feita pelas coordenadas geográficas do canto sudoeste de cada modelo (fig. 2.6).

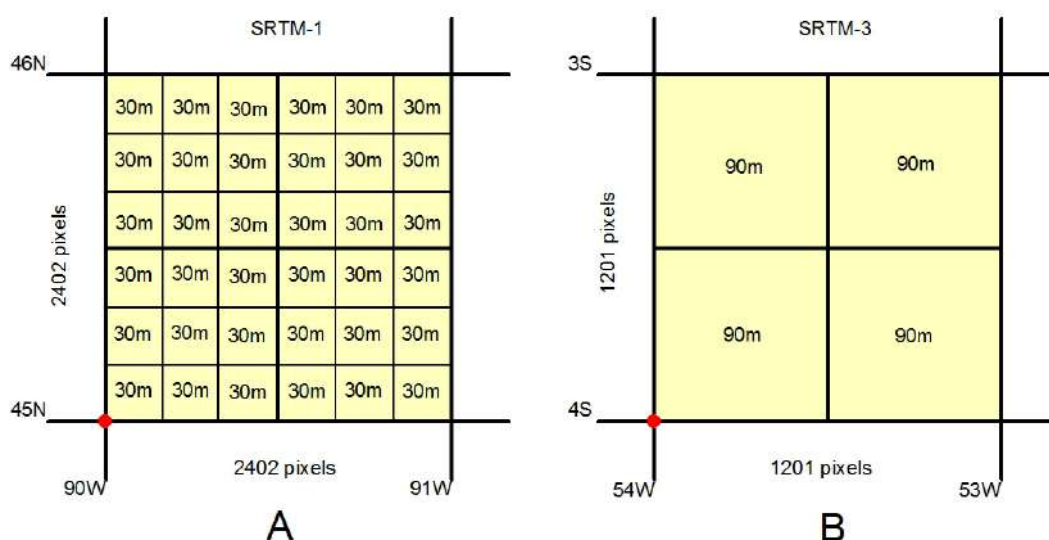


Figura 2.6: Modelo esquemático representando a organização dos modelos da SRTM. A - Nos Estados Unidos (resolução de 30m); B – Restante da Terra (resolução de 90m). Ponto vermelho representa a identificação do modelo.

Os dados da SRTM geraram quatro versões de modelos digitais de elevação: SRTM-1, SRTM-3, SRTMv2, SRTM30 e SRTMv4. Cada versão posterior à primeira trata-se de uma reamostragem de pixels da SRTM1 usando algoritmos de processamento cada vez mais avançados.

A primeira versão do SRTM (SRTM-1) foi feita somente para os Estados Unidos da América com uma resolução de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m). Ela possui erros, tais como áreas sem dados ou com valores hipotéticos como pontos com elevação muito alta e outros muito baixa. Isso ocorre em áreas onde o sinal do radar possui um retro-espalhamento muito baixo, como por exemplo em corpos d'água e linhas de costa. Esta versão é conhecida como inacabada (*unfinished*).

Após a SRTM-1 ter sido confeccionada somente para os Estados Unidos da América, foi feita uma reamostragem de 1 arco-segundo (30m) para 3 arco-segundos (90m). Esta versão foi distribuída para o resto do mundo e ficou conhecida como SRTM-3. Ela ainda continha os mesmos erros da SRTM-1.

A segunda versão do SRTM (SRTMv2) é resultado de um substancial trabalho de edição dos dados pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Esta é conhecida como a versão final. Os resultados apresentaram corpos d'água e linhas de costa bem definidas e ausência de picos e depressões, mas ainda possui áreas de vazio de dados. Essa versão é acompanhada de um vetor de linha de costa chamado de SWBD (SRTM Water Body Data) em formato shapefile (ESRI), usado como máscara na edição dos dados pela NGA. É disponibilizada pelo USGS (seamless.usgs.gov).

A SRTM30 tratou-se de uma combinação da SRTM reamostrada para 30 arco-segundos com o GTOPO30 da USGS (United States Geological Survey) de 30 arco-segundos, onde o GTOPO30 foi utilizado com o intuito de cobrir áreas de vazio do

SRTM. Este é um modelo digital de elevação aproximado do globo terrestre. Apresenta como resultado um modelo de 30 arco-segundos (aproximadamente 1km).

O SRTMv4 foi confeccionado pela CGIAR e trata-se de uma correção dos erros comuns encontrados nas versões anteriores do SRTM, como os vazios de dados. A CGIAR processou os modelos digitais de terreno (DEM) para preencher esses vazios (ou não-dados). Isto envolveu a produção de um vetor de contorno, pontos de reinterpolação desses contornos e pontos para um novo DEM, este foi usado para cobrir os vazios nos dados originais. Os dados resultantes foram mosaicados em cenas de 5 x 5 graus com datum WGS84 e estão disponíveis para download gratuito no site da CGIAR. Dois modelos complementares foram adquiridas, recortados e mosaicados para elaboração desse trabalho.

2.2.2 Reamostragem

Valeriano (2004) realizou os primeiros estudos em modelos SRTM disponíveis para a América do Sul, visando aplicações de informações do relevo. Esses modelos mostraram algumas imperfeições quanto ao uso sob sua forma original, contudo o pré-processamento do modelo permite a utilização do mesmo com resultados satisfatórios. Pouco tempo depois Santos (2005), em sua tese de mestrado, comparou os DEMs gerados a partir de cartas topográficas nas escalas de 1:250.000, 1:100.000 e 1:50.000 e o modelo SRTM, com os pontos de controle levantados em campo com GPS geodésico. Os resultados alcançados neste estudo demonstram que as informações altimétricas dos modelos SRTM são compatíveis com documentos cartográficos classe A nas escalas de 1:250.000 e 1:100.000.

Alguns usuários modificam o dado original do SRTM antes de sua utilização, o caso mais comum, é a reamostragem da resolução espacial, que corresponde

originalmente a 3 arco-segundos (aproximadamente 90m) para 1 arco-segundo (aproximadamente 30m). A reamostragem é o processo que permite atribuir ao pixel de posição $i'j'$ (numa matriz) da imagem reamostrada um valor interpolado da imagem original, melhorando sua visualização (gráfica).

Existem vários métodos de interpolação, cada qual com seus princípios, características e efeitos, cujos resultados diferem entre si quanto aos potenciais e limitações do DEM para cada finalidade. As principais famílias de métodos são: reamostragem por vizinho mais próximo, interpolações (ex: bilinear) e *splines* (regularizada, com tensão, quadrática, cúbica, bicúbica, etc.). Os principais tipos de interpoladores são explicados sucintamente a seguir:

Reamostragem por vizinho mais próximo: atribui ao valor de nível de cinza do pixel da imagem corrigida o mesmo valor do nível de cinza (NC, ou DN, do inglês *digital number*) do pixel que se encontra mais próximo da posição a ser ocupada, como mostrado na figura 2.7. Não há alteração no valor de nível de cinza. É um processamento rápido e não cria novos valores de NC (mantém estatísticas da imagem).

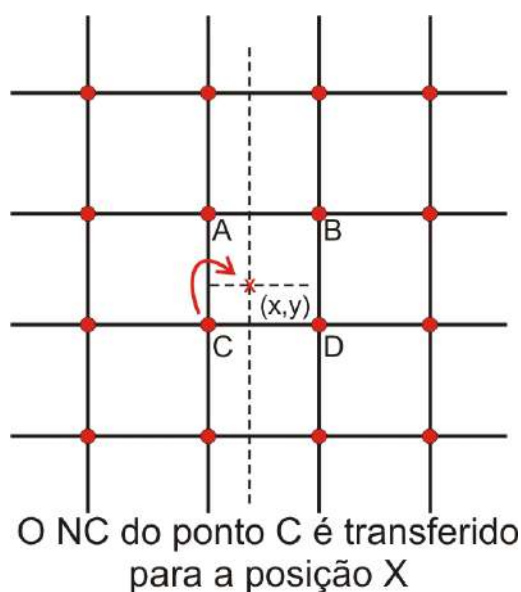


Figura 2.7: Desenho esquemático mostrando a interpolação pelo vizinho mais próximo. (modificado de INPE)

Interpolação bilinear: faz com que o nível de cinza a ser atribuído ao pixel da imagem corrigida seja determinado a partir do valor dos pixels vizinhos (4, 8, 12 ou um número pré-determinado de vizinhos, ou ainda num raio de busca de distância pré-determinada), como mostrado na figura 2.8. Como resultado, há alteração do valor do nível de cinza, considerando a sua vizinhança. Maiores detalhes sobre esta interpolação podem ser encontradas em Richards (1993).

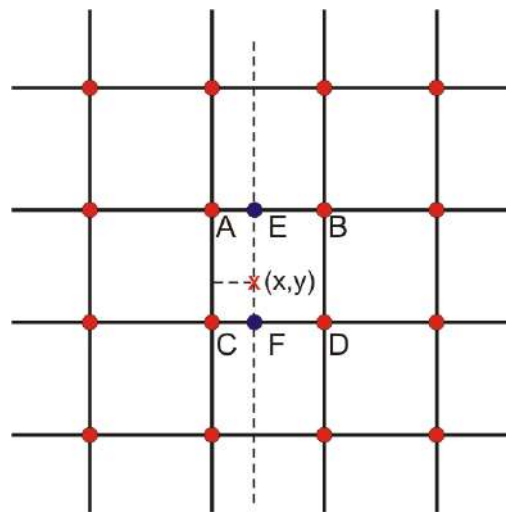


Figura 2.8: Desenho esquemático mostrando a interpolação bilinear. O valor obtido do pixel interpolado trata-se da média ponderada dos pontos E e F, o qual é transferido para a posição X produzindo um efeito de suavização devido a operação de média. (modificado de INPE)

Interpolação por convolução cúbica: Esta técnica utiliza um número pré-determinado de pixels vizinhos (ex: dezesseis) para o cálculo do valor de nível de cinza (fig. 2.9) e geralmente, produz uma imagem final com aparência esmaecida (Richards, 1993).

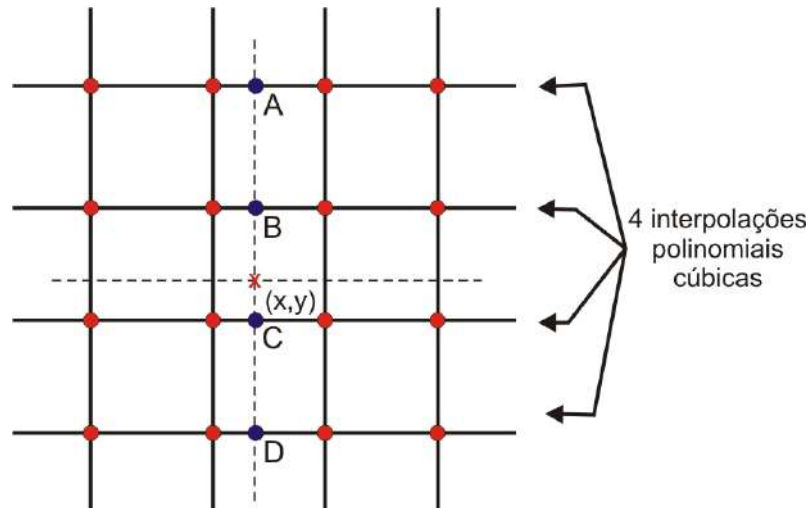


Figura 2.9: Interpolação por convolução cúbica. Introduz novos valores aos pixels (altera parâmetros estatísticos), produzindo uma imagem com aparência mais natural (modificado de INPE)

Cubic spline: A idéia fundamental da interpolação *cubic spline* é baseada na ferramenta de engenharia usada para desenhar curvas suaves através de um número de pontos. A *spline* consiste de um certo número de pesos anexados (aleatoriamente ou não) a uma superfície plana em pontos a serem conectados. Uma faixa flexível é então dobrada ao longo de cada um desses pesos, resultando em uma suave curva (fig. 2.10). A interpolação matemática é um princípio similar. Os pontos, nesse caso, são dados numéricos. Os pesos são os coeficientes em um polinômio de terceira ordem (cúbico) usado para interpolar os dados. Esses coeficientes dobram a linha fazendo-a passar suavemente através de cada ponto sem qualquer comportamento errôneo ou quebras de continuidade. (Nievergelt, 1993)

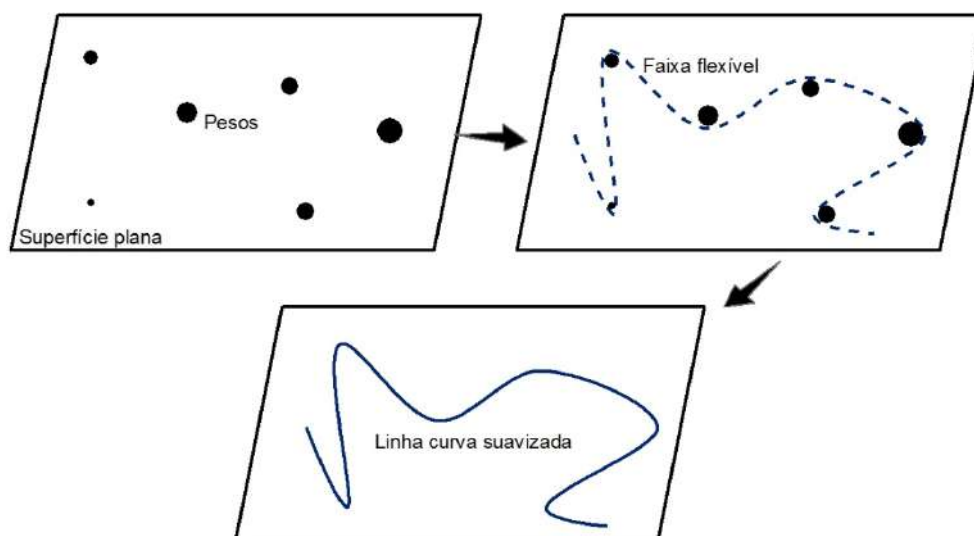


Figura 2.10: Desenho esquemático mostrando o princípio de engenharia para confecção de uma linha curva e suave.

O modelo SRTM é entendido pelo computador como uma matriz de n Linhas x m Colunas, que por sua vez é interpretada pelo programa como uma imagem de $N \times M$ pixels (vide fig.2.6, pag: 6). Cada pixel guarda um valor numérico correspondente a média da elevação de uma dada área no terreno, essa área varia com a versão do SRTM (ex.: SRTM-3 = 90x90m; SRTM-1 = 30x30m). A interpolação por *cubic spline* é uma curva construída por um polinômio de terceiro grau com intervalos contínuos. Essa curva tem a propriedade de passar através de " n " pontos de controle (no caso, o centróide dos pixels).

Neste trabalho, foi feita a reamostragem do modelo SRTM de resolução 90m para resolução de 30m pelo método *cubic spline*. Este foi escolhido, pois se trata de um método algébrico, logo este preserva o valor dos pontos originais representando a tendência geral da região amostrada, resultando em imagens mais suaves. Isso não ocorre, por exemplo, em métodos estatísticos (como krigagem) que não preservam os valores dos pontos.

Pra executar a reamostragem existem vários programas que realizam a interpolação, aqui, o programa utilizado foi o FWTools – Open EV

De maneira simplificada, quando queremos reamostrar uma imagem de resolução 90m para 30m, o programa cria uma superfície suave interpolando os centróides dos pixels de 90 m seguindo os parâmetros do *cubic spline*, em seguida são criados o que podemos chamar de “pré-centróides”, pontos eqüidistantes (na resolução alvo, 30m) ao centróide do pixel de entrada, então estipula o valor para cada “pré-centróide” de acordo com sua posição na superfície (*spline*), criando assim novos centróides, ou seja, novos pixels na resolução de 30m com valores de elevação interpolados a partir dos centróides dos pixels de resolução 90m, isso dá origem a uma nova superfície suavizada e de maior resolução. A figura 2.11 mostra um desenho esquemático da interpolação por *cubic spline*.

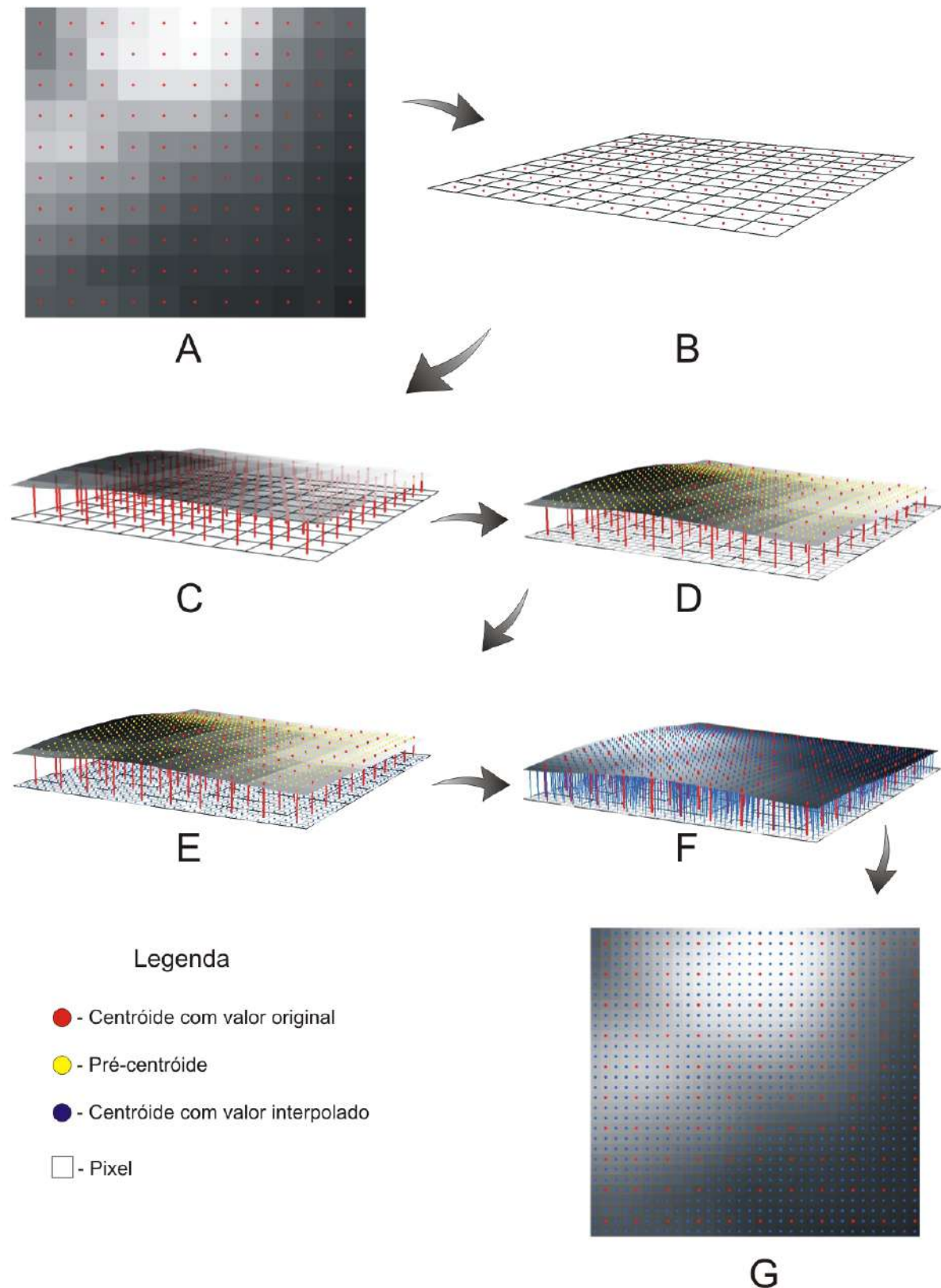


Figura 2.11: Desenho esquemático exemplificando o princípio da interpolação cubic spline. A – modelo SRTM original (resolução 90 m); B - Divisão de pixels do modelo original; C - superfície criada por interpolação (spline) dos valores dos centróides originais. D – superfície original com pré-centróides posicionados equidistantes dos - originais na resolução 30 m; E - Novos centróides criados a partir de valores estimados da superfície original; F - superfície recalculada com pixel na resolução 30 m; G - Novo modelo SRTM com resolução 30 m.

2.3 Técnicas de Realce de Estruturas e Interpretação de Imagem de Sombreamento

Neste trabalho, as imagens de sombreamento são derivadas do modelo SRTM (adquirido no site da CGIAR), o qual é fornecido em sistema de coordenadas geográficas em datum WGS84. Devido a esse sistema de coordenadas, no ArcMap™, faz-se necessário aplicar uma correção de altitude, denominada “fator Z”, cuja aplicação é analisada em mais detalhes por Oliveira *et al.* (2009). Para gerar a imagem de sombreamento foi utilizada a função *hillshade* do programa ArcMap™. Nesta função é necessário informar o ângulo de iluminação do “Sol” dado em azimuth/inclinação. É muito importante a escolha adequada do ângulo de azimuth, pois esse ângulo dará destaque às estruturas perpendiculares (ou próximas) a ele. Para a elaboração deste trabalho foi escolhido como azimuth de iluminação os ângulos de 315° e 45° visto que estes são perpendiculares às principais direções de lineamentos encontradas na área (vide capítulo 3).

A interpretação da imagem de sombreamento gera um mapa de lineamento, traçado a partir do reconhecimento de cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens, de acordo com interpretação dos sombreamentos gerados. Os sombreamentos foram interpretados visualmente um por vez, primeiramente para iluminação em 45°, destacando estruturas lineares de direção principal NW-SE. Depois foi feita a interpretação para iluminação em 315°, realçando as estruturas lineares de direção principal NE-SE, tomando o cuidado de visualizar as estruturas de destaque em 45° para que não ocorresse duplicidade de lineamentos. Foram também interpretados lineamentos através de feições hidrográficas (drenagens), estas foram interpretadas, a partir do modelo SRTM, de maneira automática fazendo uso do pacote de ferramentas *Hidrology Tools* contido no ArcGis™.

A figura 2.12 mostra esquematicamente como se dá o realce e interpretação das estruturas para cada ângulo de azimute no sombreamento.

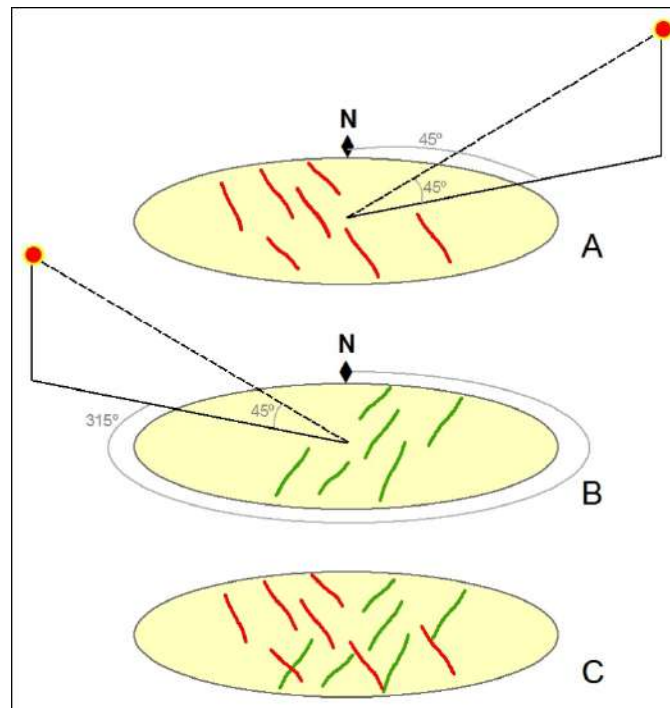


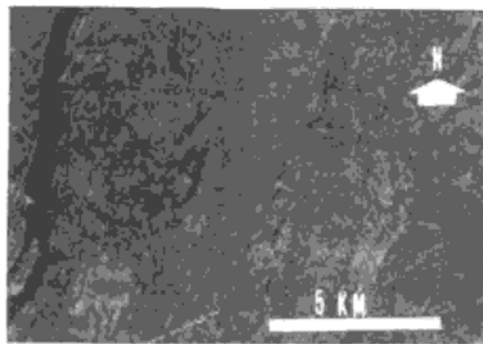
Figura 2.12: Desenho esquemático mostrando ângulos de posicionamento da iluminação do sombreamento e suas respectivas orientações de estruturas realçadas.
A – Azimute 45°, inclinação 45°, estruturas NW-SE; B - Azimute 315°, inclinação 45°, estruturas NE-SW; C - União das duas interpretações.

2.4 Textura no modelo SRTM sombreado.

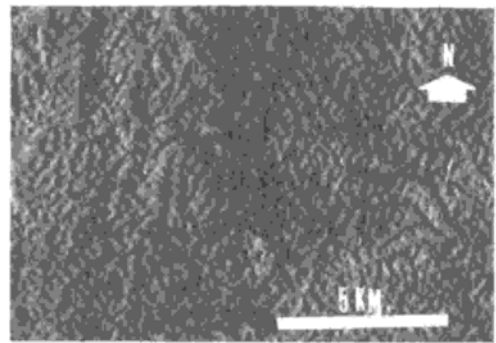
A textura é definida como a frequência de mudança de tons na imagem, produzida por um conjunto de feições tão pequenas para serem distinguidas individualmente nas fotografias ou imagens (Brawden & Pruitt, 1975). A imagem (visual) original formada pelo modelo SRTM não induz a nenhuma textura aparente já que ela é uma mera classificação para faixas de valores de altimetria do terreno. Para obter um padrão textural e uma sensação visual de três dimensões do terreno, devemos gerar uma imagem sombreada (*hillshade*) a partir do modelo (como visto no subitem 2.3). Essas imagens de sombreamento são similares às imagens radargráficas, representando fielmente a morfologia do terreno (assumindo os erros do modelo SRTM, vide subitem 2.2).

Essas imagens geradas pelo sombreamento do modelo fornecem uma variedade significativa de "células texturais". Estas são definidas como um conjunto de pixels, com formas e limites bem delineadas e grande repetição espacial. Então, uma "célula textural" pode ser entendida por feições que pelos seus parâmetros representem retorno de sinais aproximadamente iguais. Como por exemplo, a superfície de um lago, superfícies planas com cobertura vegetal uniforme e idêntica, e principalmente conjuntos de morros com mesma cota, forma e disposição geométrica. O termo "célula" é empregado no sentido de uma unidade estrutural básica, a semelhança da célula dos seres vivos, cujo conjunto recebe a denominação de tecido. Esses mostram como característica fundamental a repetição espacial e formas bem definidas. Utiliza-se no presente trabalho a definição de textura como um conjunto de "células texturais" de Rivereau (1970).

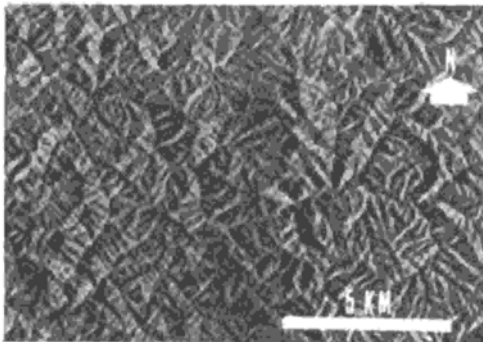
Após a conceituação de textura, torna-se necessário qualificá-la a fim de que se possa analisá-la quanto à interpretação. Em vista disso, utilizam-se as seguintes adjetivações (Lima, 1995): lisa, muito fina, fina, média, grossa e muito grossa. Esses termos podem ser entendidos, neste trabalho, como: lisa, baixa rugosidade, rugosa, alta rugosidade. No entanto para que se possa identificar e qualificar essas texturas na imagem de Radar sugere-se utilizar os seguintes critérios para as classes texturais apresentadas na figura 2.13.



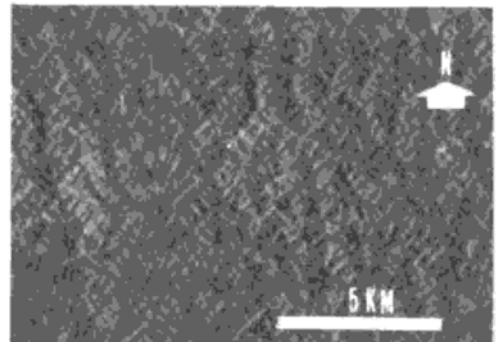
a) Lisa (SD.23-X-D)



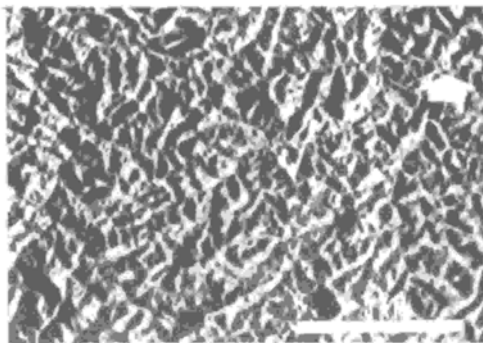
b) Muito Fina (SB..22-X-C)



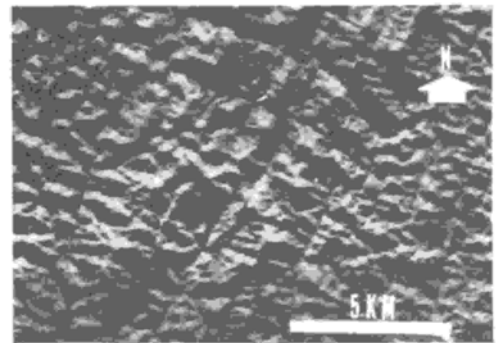
c) Fina (SD.23-Y-C)



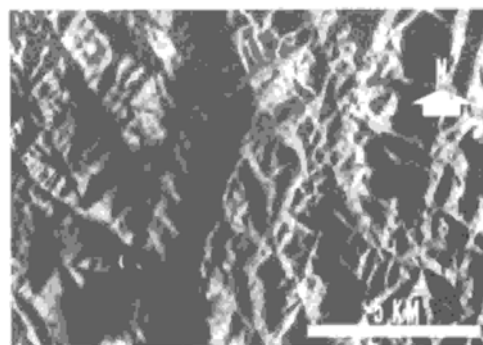
d) Fina Média (SB..22-X-C)



e) Média (SF.23-X-D)



f) Média (SD.24-V-D)



g) Grossa (SF.24-V-A)



h) Grossa-Muito Grossa (SD.24-V-D)

Figura 2.13: Texturas radargráficas (Lima, 1995)

Ainda segundo Lima (1995), além do aspecto da classificação de textura sobre um DEM sombreado, para a formulação de um mapa lito-textural, convém classificar a forma e padrão do relevo. Quando formas tiverem um controle geométrico definido dizemos que esta é uma Estrutura. Estruturas podem ser lineares, planares, tabulares, etc. Quando observamos um conjunto de estruturas similares, denominamos de padrão, isto é: padrão de cristas, padrão de morros, padrão de topos, fraturas, etc.

Neste trabalho foram enfocadas as características de topos, cristas (quando observadas) e elevação relativa de relevo. Da reunião dessas características têm-se unidades texturais. É importante enfatizar que unidades aqui descritas (e distinguidas em mapa) não são apenas baseadas somente no aspecto da textura propriamente dito e sim no conjunto de características e padrões citados.

Quatro tipos de topos podem ser observados comumente em imagens de radar (no caso SRTM sombreada): plano, côncavo, convexo e agudo. Os três últimos podem ser abertos ou fechados. A figura 2.13 exemplifica tipos comuns de topos encontrados em imagens de radar.

Morros com topo agudo e convexo (fechado) podem formar cristas, essas podem ser simétricas, assimétricas, lineares ou sinuosas. Neste trabalho foram descritas apenas cristas lineares, quando observados morros com padrão linear / retilíneo. Cristas sinuosas e retilíneas podem ser observadas nos exemplos da figura 2.14 (e, f, g, h).

A elevação das unidades descritas foi feita de maneira comparativa sendo descrita como: muita baixa, baixa, média e alta.

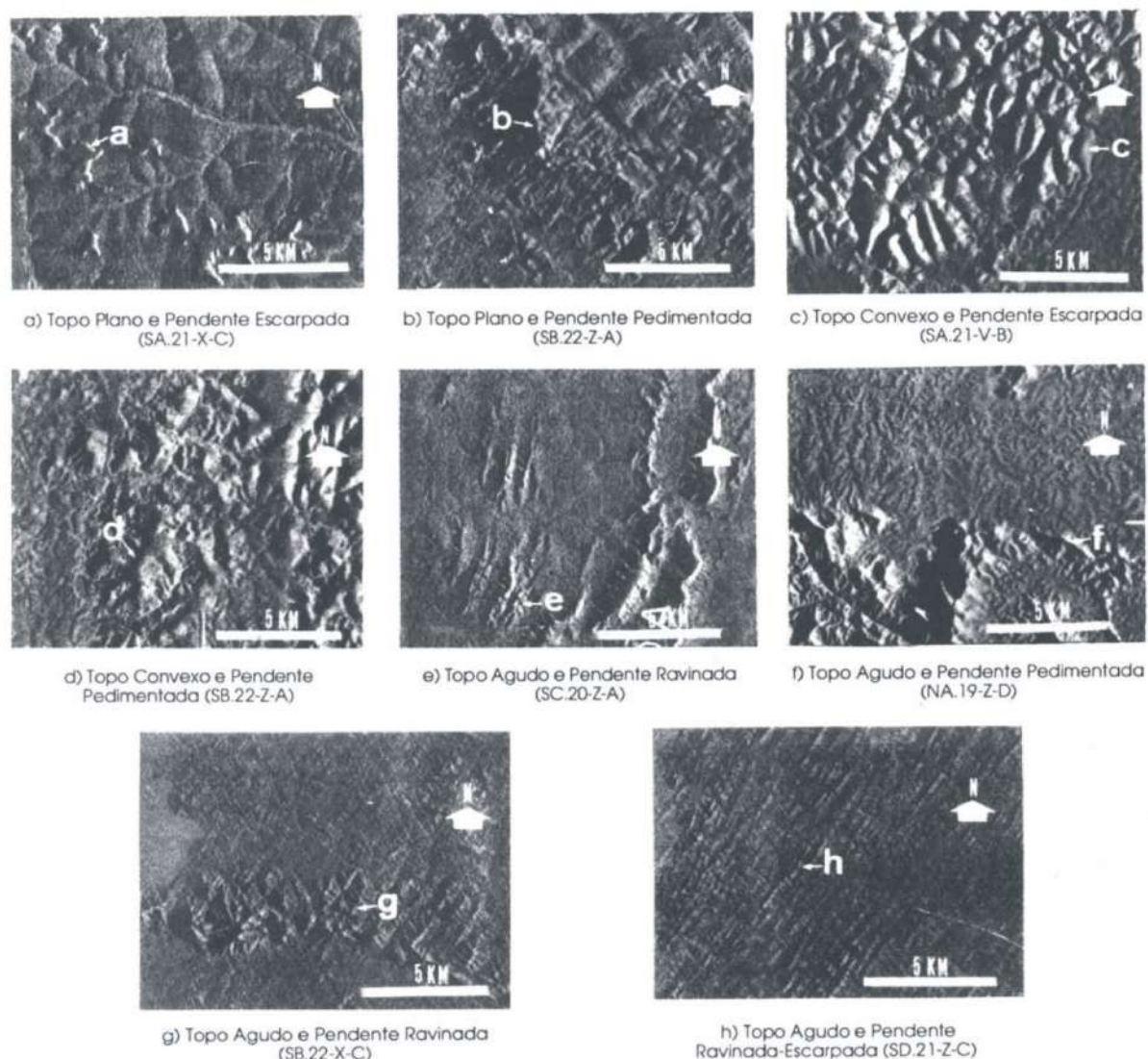


Figura 2.14: Tipos comuns de topos encontrados em imagens de radar. De (e) até h observa-se topos agudos formando cristas. Cristas lineares podem ser melhor observadas em h. O termo pendente trata-se da encosta dos morros, porém essa característica não foi utilizada para esse trabalho. (Lima, 1995)

2.4.1 Interpretação Litológica por textura

Muitas vezes podemos olhar para uma imagem de radar (ou um modelo de sombreamento) e identificarmos texturas comuns para certos tipos litológicos ou estruturas, mas não é sempre fácil reconhecer uma litologia. Estudos anteriores nos mostram padrões já pré-identificados e associados à geologia. Esses padrões levam em consideração o clima, textura, morfologia de relevo, encostas, etc. Desta maneira uma boa e completa descrição morfotextural da área passa a ser uma importante

etapa em um mapeamento geológico, principalmente em áreas onde o acesso é muito difícil ou mesmo restrito. A figura 2.15 resume padrões de textura para identificação de litotipos.

IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS ÍGNEAS			
ÁCIDAS		BÁSICAS	
1. <i>Stocks</i> com formas circulares elípticas ou em oito.		1. <i>Stocks</i> com formas alongadas.	
2. Vulcânicas geralmente compõem relevo fraco em relação às plutônicas.		2. Vulcânicas compõem platôs similares a rochas sedimentares.	
3. Plutônicas grosseiras ocupam relevo fraco em relação às de granulação média e fina.		3. Em climas úmidos: textura lisa, tom cinza-escuro, topo plano e presença de lagos.	
4. Padrões de drenagens anelar e radial.		4. Em climas úmidos: drenagem multibasinal.	
5. Drenagens com sinuosidade elevada.			
IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES			
PSAMITOS/RUDITOS	PELITOS	CARBONATOS	
1. Pendentes escarpadas c/colúvios.	1. Pendentes ravinadas.	1. Pendentes abauladas.	
2. Drenagem com baixa densidade.	2. Drenagem com alta densidade. Vales afogados.	2. Drenagem com baixa densidade e rios cegos.	
3. Drenagens dendrítica e paralela.	3. Drenagens dendrítica e paralela.	3. Drenagem multibasinal (dolinas).	
4. Relevo positivo.	4. Relevo negativo.	4. Relevo negativo em climas úmidos.	
5. Tom cinza-escuro devido à ausência de vegetação.	5. Tom cinza.	5. Presença de <i>corner reflector</i> (tom branco).	
6. Médio grau de integração.	6. Alto grau de integração.	6. Baixo grau de integração.	
IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS METAMÓRFICAS			
FILITOS/XISTOS	GNAISSES	QUARTZITOS BIF/CHERT	ANFIBOLITOS
1. Em climas úmidos: relevo fraco a arrasado e textura fina.	1. Em climas úmidos e relevo médio a forte: textura média e grosseira.	1. Cristas com grande extensão espacial bifurcadas (estrutura "pata de caranguejo").	1. Em climas úmidos: corpos alongados com topo plano.
2. Pendentes ravinadas.	2. Pendentes com pouco ravinaamento.	2. Pendentes escarpadas.	2. Pendentes com pouco ravinaamento.
3. Feições lineares bem desenvolvidas.	3. Feições lineares e planares.	3. Feições planares. Aparecimento de estruturas tabulares.	3. Ausência de feições planares e lineares.

Figura 2.15: Tabelas retiradas de Lima (1995), resumindo os principais padrões morfotexturais para reconhecimento de litotipos em imagens de radar.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Contexto geológico regional

A região da Província mineral de Carajás situa-se no leste-sudeste do Escudo Brasil-Central, no sudeste do Craton Amazonas (Santos *et al.*, 2000).

Sua designação como província deve-se a ampla riqueza mineral tais como grandes depósitos de ferro, como os da Serra Norte (N1 e N2), Sul (S1 a S45) e Leste. Interpreta-se que esta província representa uma bacia neoarqueana que recobre um embasamento mesoarqueano e contém rochas de complexos ígneos e metamórficos (Tassinari *et al.*, 2000).

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2003), a província pode ser subdividida em dois domínios distintos: Rio Maria (Mesoarqueano) ao sul, e Carajás (Neoarqueano) ao norte.

O Domínio Rio Maria, constituído essencialmente por terrenos tipo granitóide-greenstone, com idades na faixa de 2,85–3,05 Ga. Já o Domínio Carajás engloba rochas inseridas no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. Tendo como mais antigas, as rochas do tipo gnaiss de fácies anfibolito e de composição granodiorítica e tonalítica atribuídos ao complexo Xingu e rochas de fácies granulito, correspondendo ao complexo Pium (mais velho). Apesar dos Complexos Xingu e Pium serem mesoarqueanos o Domínio Carajás é predominantemente neoarqueano e caracterizado por seqüências vulcanossedimentares (Grupo Grão Pará) e granitóides. Santos *et al.* (2002) mostram uma outra interpretação para o Domínio Carajás, tratando os dois como um só domínio (fig. 3.1).

O Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas é constituído por dois sub-domínios principais: O Sistema Transcorrente do Cinzento e Carajás (fig 3.2).

O Sistema Transcorrente do Cinzento mostra um movimento sinistral, orientado WNW–ESE.

O Sistema Transcorrente Carajás é representado pela Falha Carajás, esta possui direção geral WNW-ESE, comprimento de aproximadamente 200 km, é composta por feixes de traços descontínuos e curvos com seu término imbricado para sul (inserido na área de estudo).

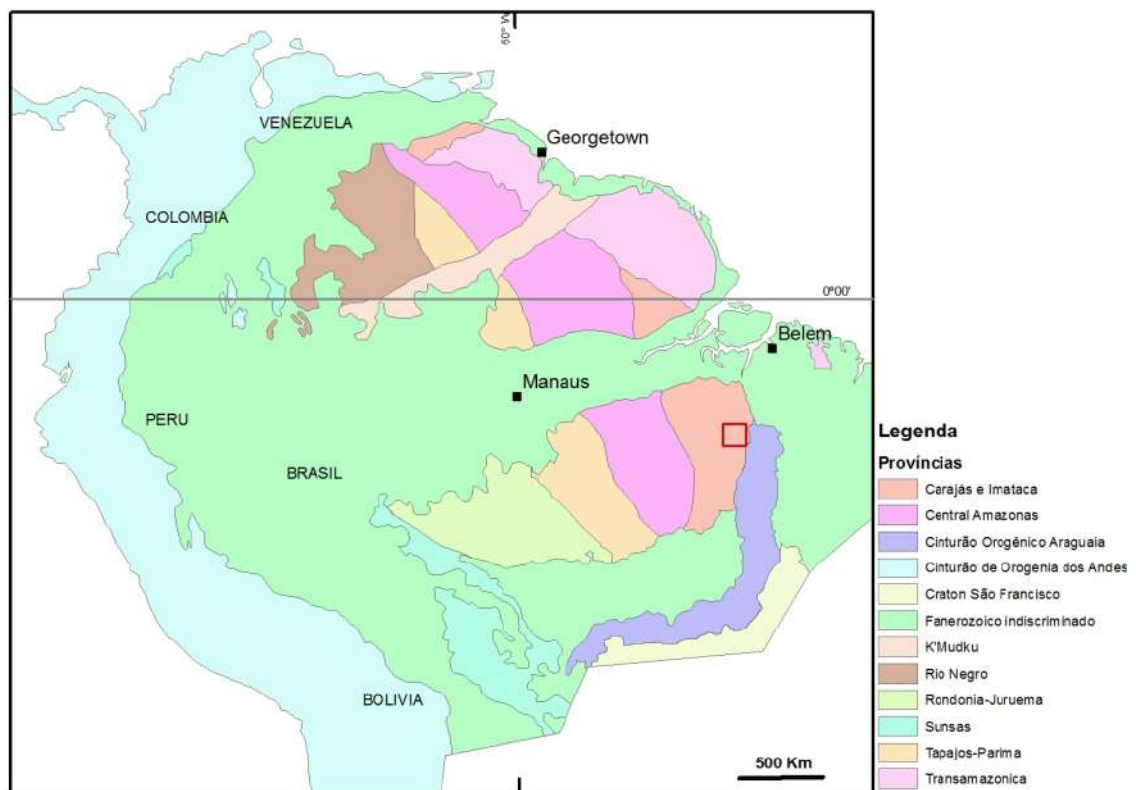
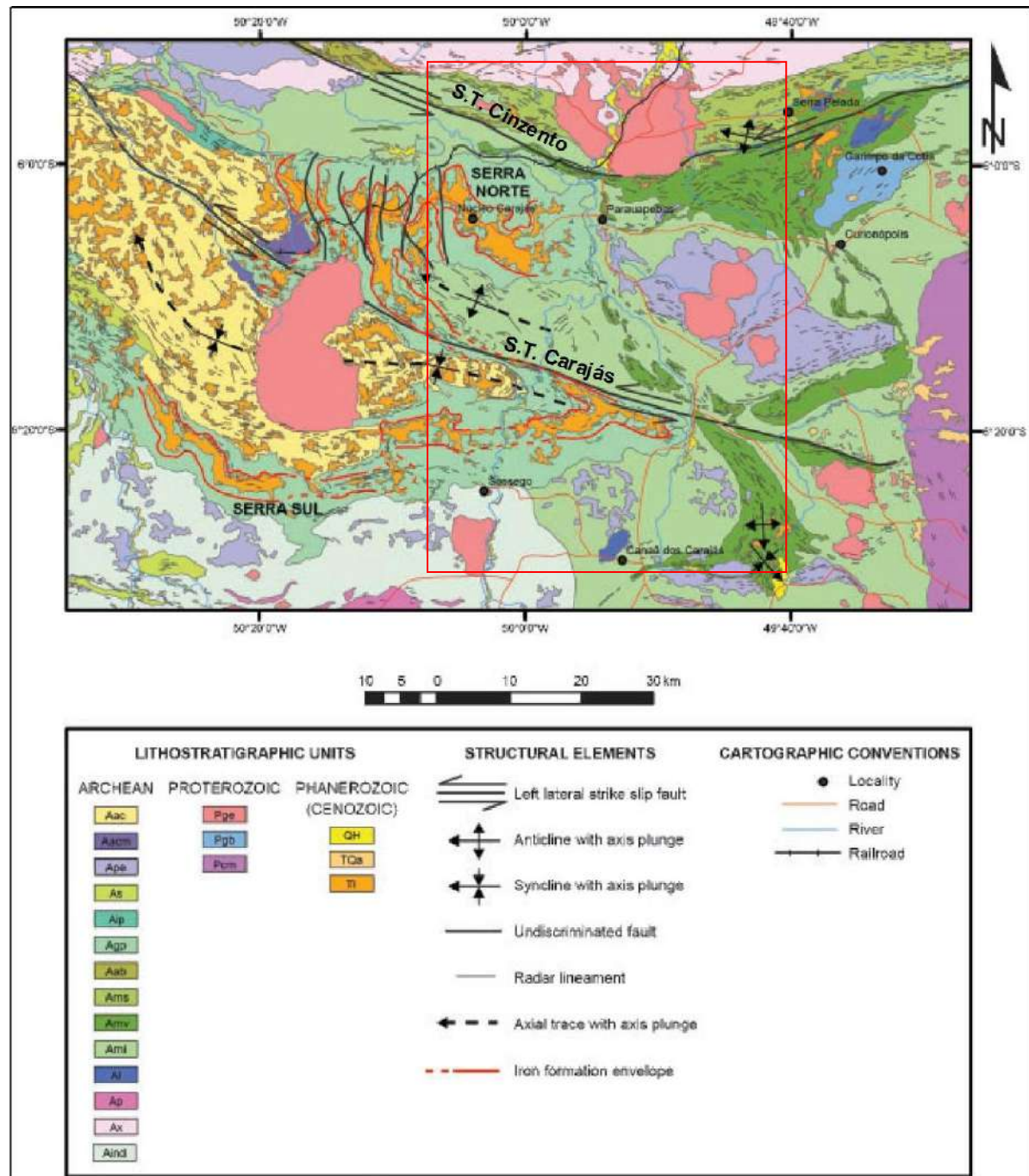


Figura 3.1: Principais províncias do Cráton Amazonas na América do Sul. Área de estudo em vermelho. Modificado de Santos *et al.* (2002).



Cenozoic: QH – Quaternário-Holoceno: aluvião; TQa – Terciário-Quaternário: sedimentos e laterita; TI – Terceário: carapaças lateríticas;
Proterozoic Units: Pcm – Superggrupo Araguaia; Pge – Granitos e Granitóides Palaeoproterozoicos; Pgb – Gabros Palaeoproterozoicos;
Archean Units: Aac – Arenitos arcossianos Formação Águas Claras; Aacm – Pelitos Formação Águas Claras; Ape – Suite Plaqué Granito-Gneisse & Estrela; As – Grupo Sapucaia; Aip – Grupo Igarapé Pojuca; Agp – Grupo Grão Pará; Aab – Rio Bonito Group; Arn – Grupo Rio Novo (não dividido); Arms – Grupo Rio Novo: metasedimentos; Armv – Grupo Rio Novo: rochas metavolcânicas, amfibolitos, BIFs; Al – Suite Luanga: corpos intrusivos básicos, ultrabásicos; Ap – Complexo Pium: granulitos; Ax – Complexo Xingu; Aind: Unidades Arqueanas não diferenciadas

Figura 3.2: Mapa geológico-estrutural abrangendo porção oeste adjacente à área de estudo (área em vermelho). Observar as subdivisões do Cinturão Cisalhamento Itacaiúnas : S.T. Cinzento e S.T. Carajás. Modificado de Rosière et al.(2006).

3.2 Geologia Local

A área de estudo situa-se no Craton Amazônico a leste do Escudo Brasil-Central, no Domínio Carajás da província estrutural de mesmo nome (fig. 3.1).

Apesar da dificuldade de mapeamento imposta pela vegetação esta foi bem estudada devido à riqueza mineral lá encontrada. Tendo em vista as muitas outras versões anteriores publicadas, de acordo com relatório apresentado ao DNPM pela Vale (CVRD, 2004), a melhor versão de mapa geológico disponível para a Província Mineral de Carajás é de Bizzi *et al.* (2001) (fig. 3.3), porém trabalhos posteriores mostraram melhor detalhamento da área, sendo assim, o mapa base utilizado neste trabalho é uma atualização feita por Lobato *et al.* (2002) do mapa de Bizzi *et al.* (2001), a partir de mapeamento detalhado de campo nas áreas das minas de ferro da Vale e de fotointerpretação, (fig. 3.4). A este foi feito um recorte representando a área de estudo. Lobato *et al.* (2005) apresentaram um esquema geocronológico das unidades lito-estratigráficas da Província Mineral Carajás (fig. 3.5). Este esquema serve como modelo geocronológico para as unidades de mapeamento contidas na área de estudo. São apresentadas abaixo:

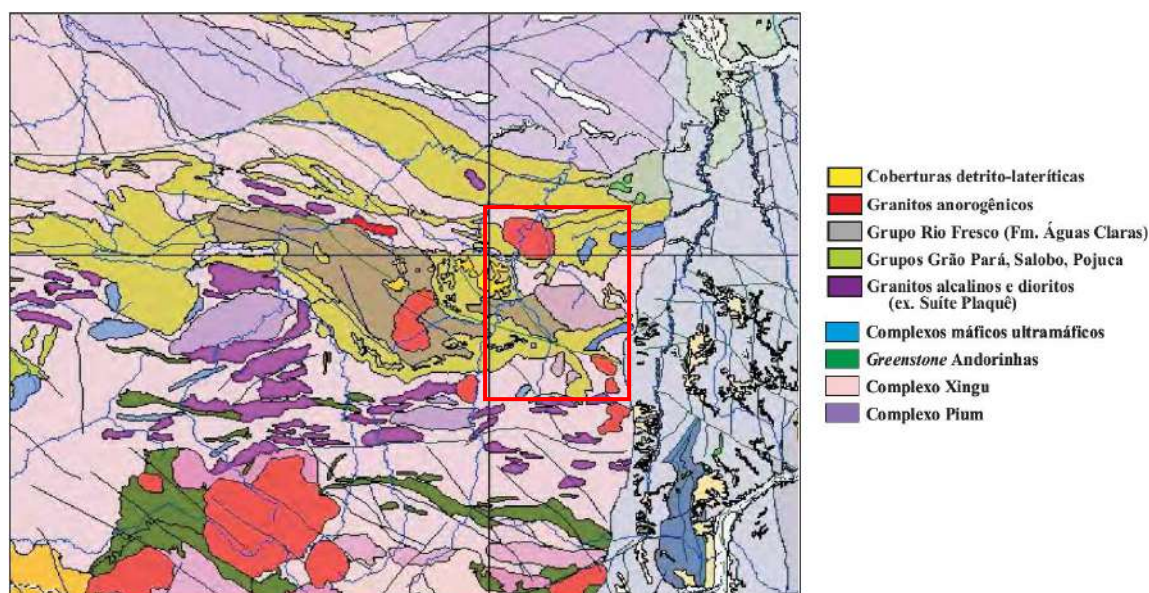


Figura 3.3: Mapa geológico da Província Mineral de Carajás e terrenos adjacentes (extraído de Bizzi *et al.*, 2001), com resolução na escala 1:2.500.000. Consultar sistema de informações geográficas (SIG, Seoane e Baars 2002) para detalhes litoestratigráficos e para legenda, Bizzi *et al.* (2001).

Complexo Xingu: Silva *et al.* (1974) descreve este complexo como terrenos granito-gnaissicos tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG). Na área, esta unidade

mostra-se disseminada de norte a sul e é a unidade com maior presença. Nela encontram-se rochas do tipo gnaiss Diorítico, metagabro, metavulcânica ultrabásica, ortognaiss, paragnaiss, anfibolito, migmatito, gnaiss granodiorítico, gnaiss granítico e granulito.

Suite Cateté: Macambira & Ferreira Filho (2001) descrevem essa suite como um conjunto de corpos máficos-ultramáficos com direções principais N-S, E-W e NE-SW. Essa unidade é a menos expressiva na área, localizando-se a sul da área. Ela apresenta-se como rochas do tipo norito, gabro, piroxenito, peridotito e serpentinito.

Granito Estrela: O Complexo Granito Estrela (Barros, 1997) é descrito como granitos, sienito e diorito, interpretado como sin-orogênico e intrusivo nas rochas das unidades vulcanossedimentares do grupo Grão Pará. Essa intrusão gerou uma espessa auréola de metamorfismo de contato. Esse metamorfismo produziu uma xistosidade com direção E-W e milonitização local nas margens do pluton e nas rochas encaixantes. Na área são rochas do tipo leucogranito, granodiorito, granitóides e apresentam-se principalmente ao sul da falha Carajás e em esporádicas áreas ao norte.

Suite Plaquê: A suite cálcio-alcalina Plaquê compreende corpos intrusivos graníticos do tipo I (arco de ilhas) e de monzonitos alongados com orientação E-W. Na área essa unidade é incorporada ao granito estrela tendo a mesma disposição, principais ocorrências ao sul e esporádicas ao norte da Falha Carajás.

Grupo Grão Pará: Trata-se da mais importante unidade da província Carajás, é nessa seqüência vulcano-sedimentar onde se encontra os depósitos ferríferos explorados pela companhia Vale. O Grupo Grão Pará (Beisiegel *et al.* 1973) de maneira geral é composto por rochas vulcânicas máficas e félsicas associadas a sedimentos e lentes de Formação Ferrífera Bandada, incluindo jaspilitos. Inicialmente foi descrito com três formações: Formação Parauapebas (base), Formação Carajás e Igarapé Cigarra. Encontra-se principalmente na porção oeste da área e é representado por grandes serras bem destacadas no relevo. De acordo com mapeamento realizado por Lobato *et al.* (2002) os grupos Igarapé Salobo e Rio Novo, foram integradas ao Grupo Grão Pará e tratadas como uma só formação nomeada Formação Igarapé Salobo.

Formação Parauapebas é uma unidade vulcânica máfica, representada por rochas vulcânicas básicas apresentando predominância de metabasaltos e metadacitos (Araujo & Maia, 1991).

A Formação Carajás é uma unidade de jaspilitos intermediária, composta por formações ferríferas bandadas e corpos de minérios de ferro associados. Os jaspilitos apresentam-se em camadas.

A Formação Igarapé Cigarra foi descrita por Macambira *et al.* (1990) como sendo uma unidade superior aos jaspilitos formada por rochas metavulcanicas

A Formação Igarapé Salobo trata-se de uma seqüência metavulcano-sedimentar que recobre discordantemente os gnáisses trondjemíticos do embasamento (Complexo Xingu). A seqüência é constituída por quartzitos, anfibolitos, metagrauvacas, BIFs e magnetititos maciços ou foliados. Na área de estudo apresenta-se no extremo norte e é intrudido pelo granito Central Carajás.

Grupo Rio Fresco (Fm. Águas Claras): As rochas metavulcanossedimentares (Grupo Grão Pará) são cobertas por rochas metassedimentares psamo-pelíticas da Formação Águas Claras (metarenitos, metacalcarenitos, metassiltitos e metaconglomerados). Essa formação foi anteriormente denominada de Grupo Rio Fresco (DOCEGEO, 1988). Nogueira (1995) propôs a retirada da Formação Águas Claras do Grupo Rio Fresco tornando-a uma unidade a parte e disposta discordantemente sobre o grupo Grão Pará, fato posteriormente descartado (Lobato *et al.*, 2002). Na área esta unidade apresenta-se geograficamente ao sul da Falha Carajás e é envolta pelo grupo Grão Pará, sendo composta de rochas do tipo pelitos, arcoseos, arenitos e conglomerados.

Granito Central Carajás e Granito Cigano: Plutons de granito anorogênicos que ocorrem intrudidos tanto no embasamento quanto nas rochas supracrustais. Apresentam-se de forma disseminada na área com maior presença ao norte, são rochas do tipo alcali-granitos, granodioritos e dioritos. Não apresentam orientação preferencial ou qualquer traço de metamorfismo. Lobato *et al.* (2005) sugerem uma interpretação alternativa de que tais granitóides sejam as manifestações intracontinentais de colisão continental distal ao arco magmático propriamente dito, estes representados por ambiente crustal tectônico distensivo, com possível herança radiogênica da placa subductada rasa e da litosfera associada.

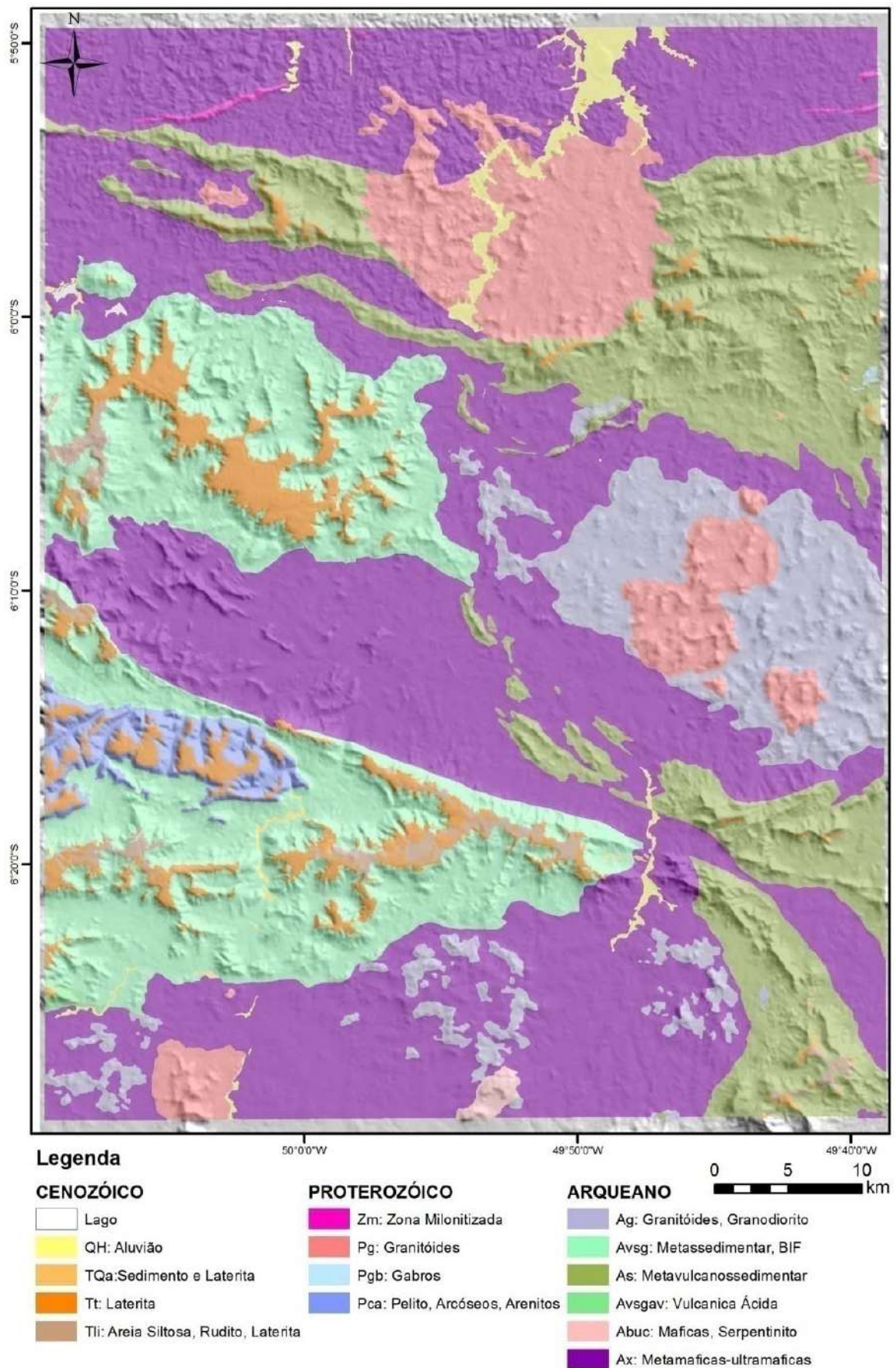


Figura 3.4: Mapa geológico da área de estudo, recorte do mapa produzido por Lobato *et al.* (2002)

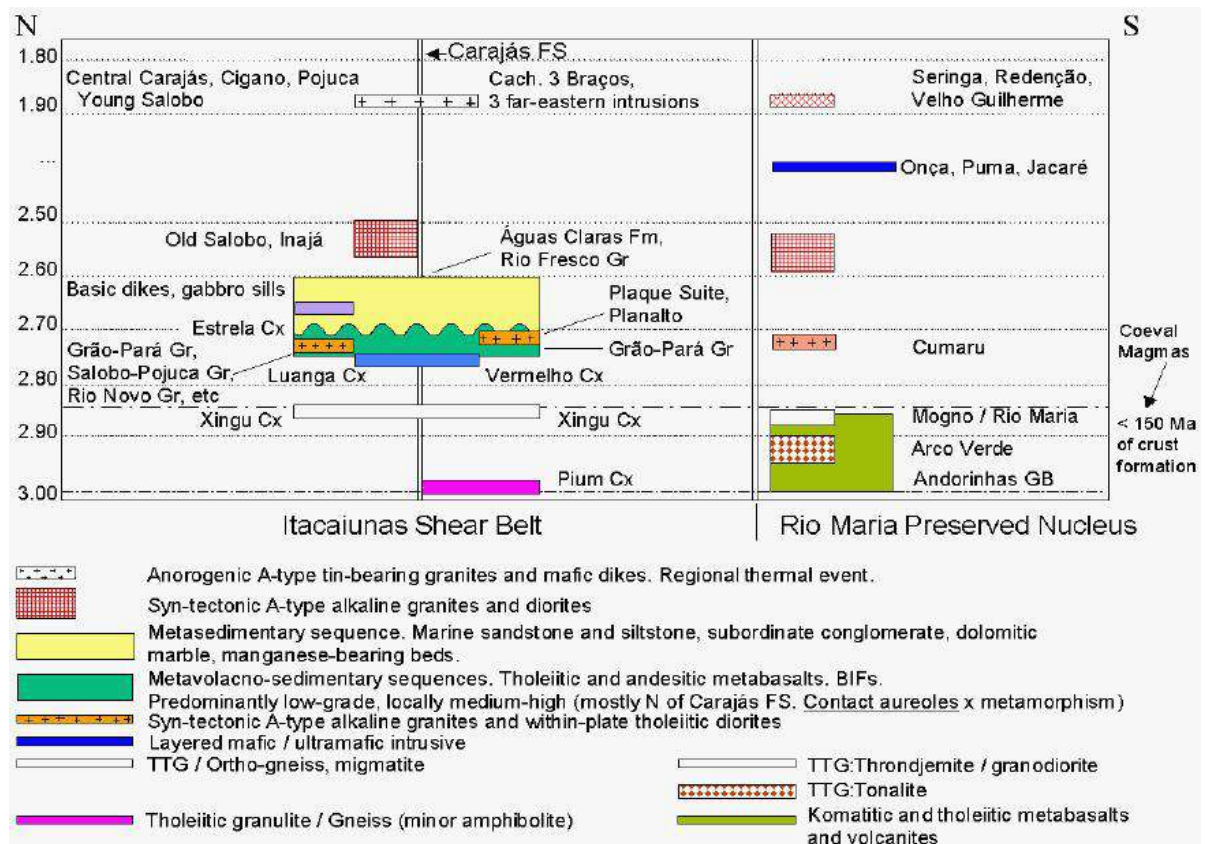


Figura 3.5: Esquema geocronológico das principais unidades lito-estratigráficas da Província Mineral Carajás (Lobato *et al.*, 2002)

4 RESULTADOS

4.1 Mapa de Lineamentos

Mapa de lineamentos foi produzido por interpretação visual através das imagens de sombreamento de azimutes 45° e 315° (ver subitem 2.3, pag. 15). Este mapa ajudou na interpretação de algumas texturas orientadas por feições estruturais (lineamentos). Essa interpretação gerou um mapa composto por 1546 traços de lineamentos estruturais (fig. 4.1a, 4.1b e 4.1c. pag: 32, 33 e 34), esses, por sua vez, foram separados em três grupos de acordo com a forma de aquisição: azimuth 45°; azimuth 315° e drenagem. Sendo respectivamente lineamentos traçados no sombreamento de 45°, 315° e por feições de drenagens. O principal grupo de lineamento é o azimuth 45°, pois este destaca o principal *trend* estrutural da área de estudo (NW-SE, Cinturão Itacaiunas).

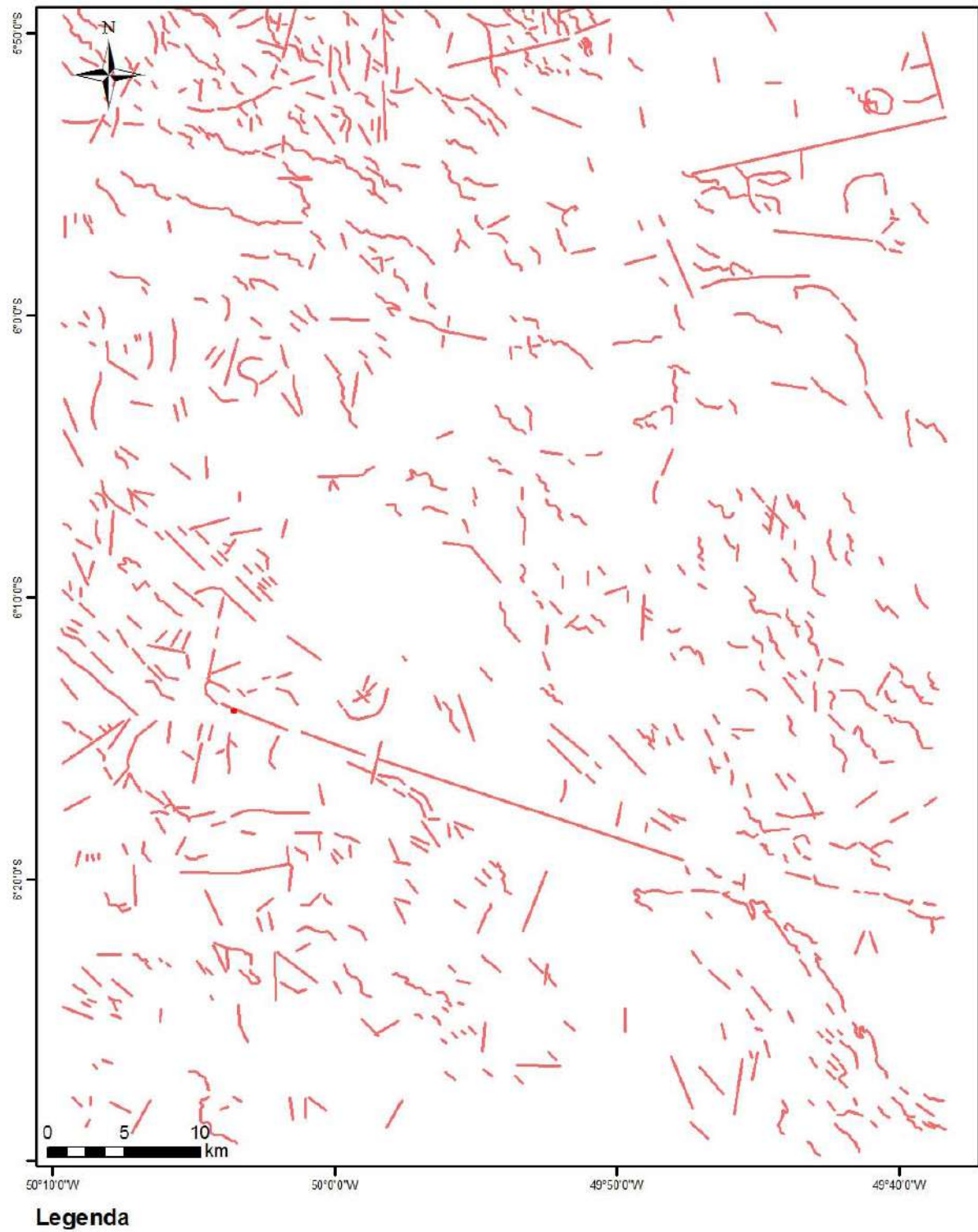


Figura 4.1a: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em sombreamento de 45°.

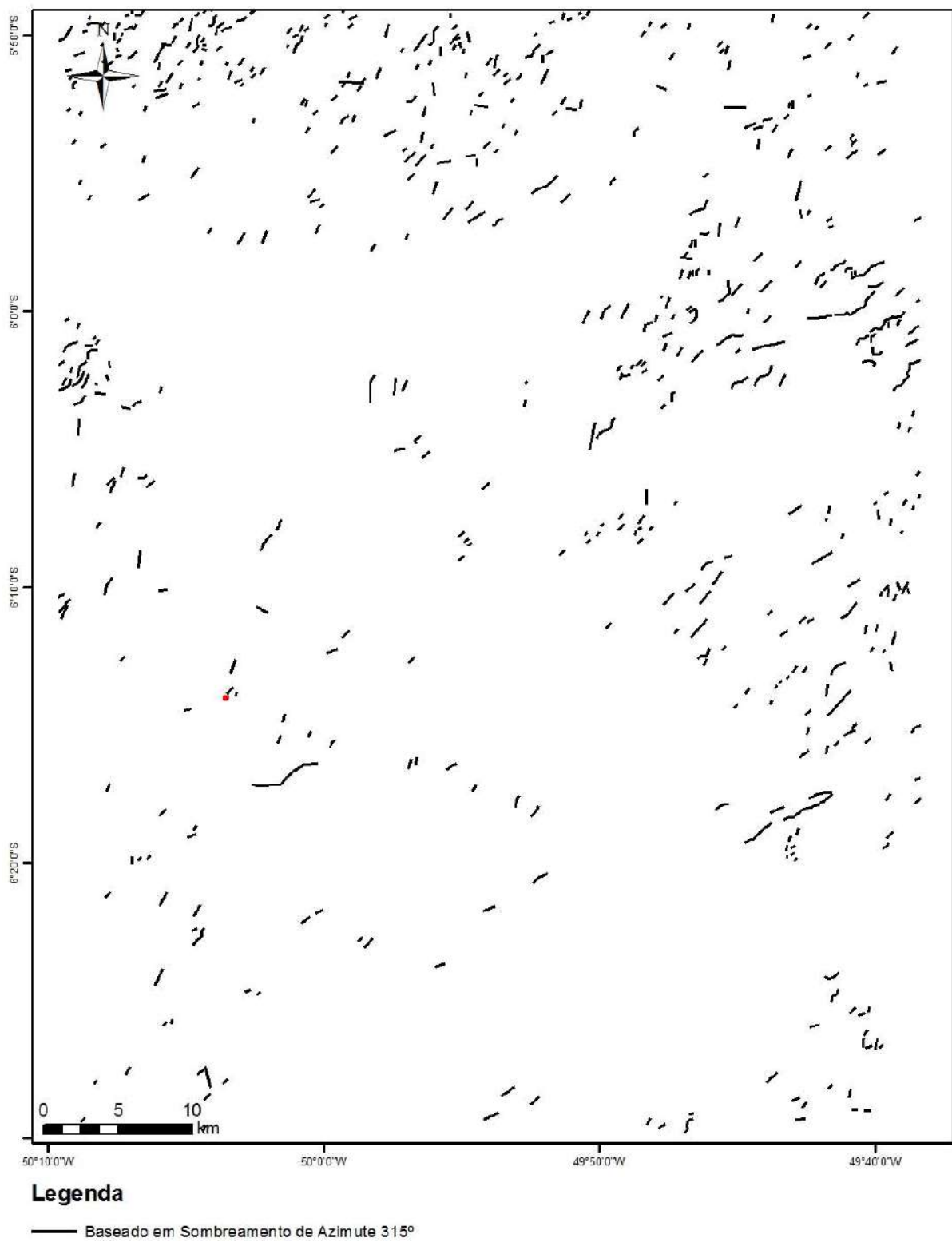
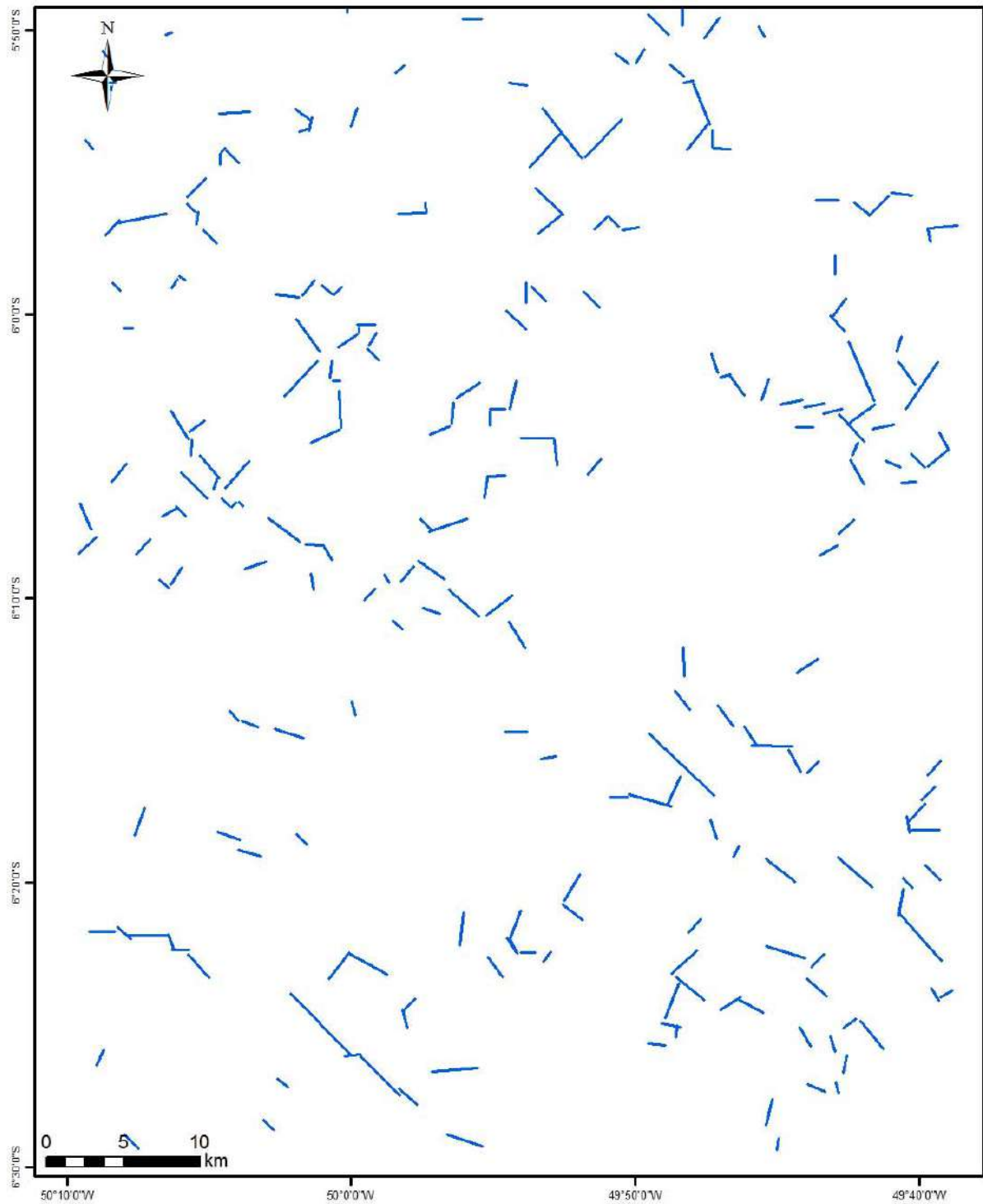


Figura 4.1b: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em sombreamento de 315°.



Legenda

— Baseado em feições de Drenagem

Figura 4.1c: Mapa de lineamentos estruturais. Traços baseados em feições de drenagem.

4.2 Mapa Textural

A presença de uma descontinuidade de relevo em fotogeologia, genericamente, sempre está relacionada diretamente com as estruturas geológicas e

litologia: falhas, contato litológico, litotipos, etc. Desse modo, aconselha-se sempre delinear as descontinuidades de relevo, mesmo se considerando sua posição relativa, a fim de posteriormente estabelecer suas relações com a geologia do terreno.

As descontinuidades e diferenças de relevo são interpretadas em fotografias aéreas, imagens de radar ou em modelos SRTM (aspecto, abordado neste trabalho), como diferenças texturais (ver sub-item 2.4, pag. 16). Essas interpretações geram mapas de limites texturais que por sua vez, quando associados a geologia da área, são tratados como mapas lito-texturais.

Foram descritas onze unidades texturais (ou morfológicas), baseadas em elevação relativa do relevo, padrão de topo (englobando cristas), e textura. Essas foram descritas separadamente e de forma individual, primeiramente elevação relativa, depois padrão de topo, em seguida textura. A figura 4.2 (pag. 17) apresenta o modelo SRTM sombreado com os traçados de contatos entre as unidades texturais (quebras morfológicas de relevo).

A partir do mapa de contatos entre quebras de relevo, podemos ter uma observação mais didática sobre as diferenças entre unidades morfotexturais e então dar início a descrição de cada uma delas individualmente em uma escala maior. Oitenta polígonos foram traçados representando esses contatos, os mesmos foram classificados e distribuídos entre as onze unidades texturais descritas. O quadro 4.1 (pag. 39) apresenta as onze descrições para as unidades texturais encontradas no modelo SRTM sombreado. Essas foram separadas em campos (critérios) distintos de classificação: relevo, textura e topo. A combinação desses três critérios resultou na unidade textural que por sua vez foi associada a um identificador (ID) numérico, onde sua seqüência numérica em nada se relaciona com aspectos geológicos ou

cronológicos. O conjunto das unidades texturais representa o mapa morfotextural do modelo sombreado (fig. 4.3, pag. 38).

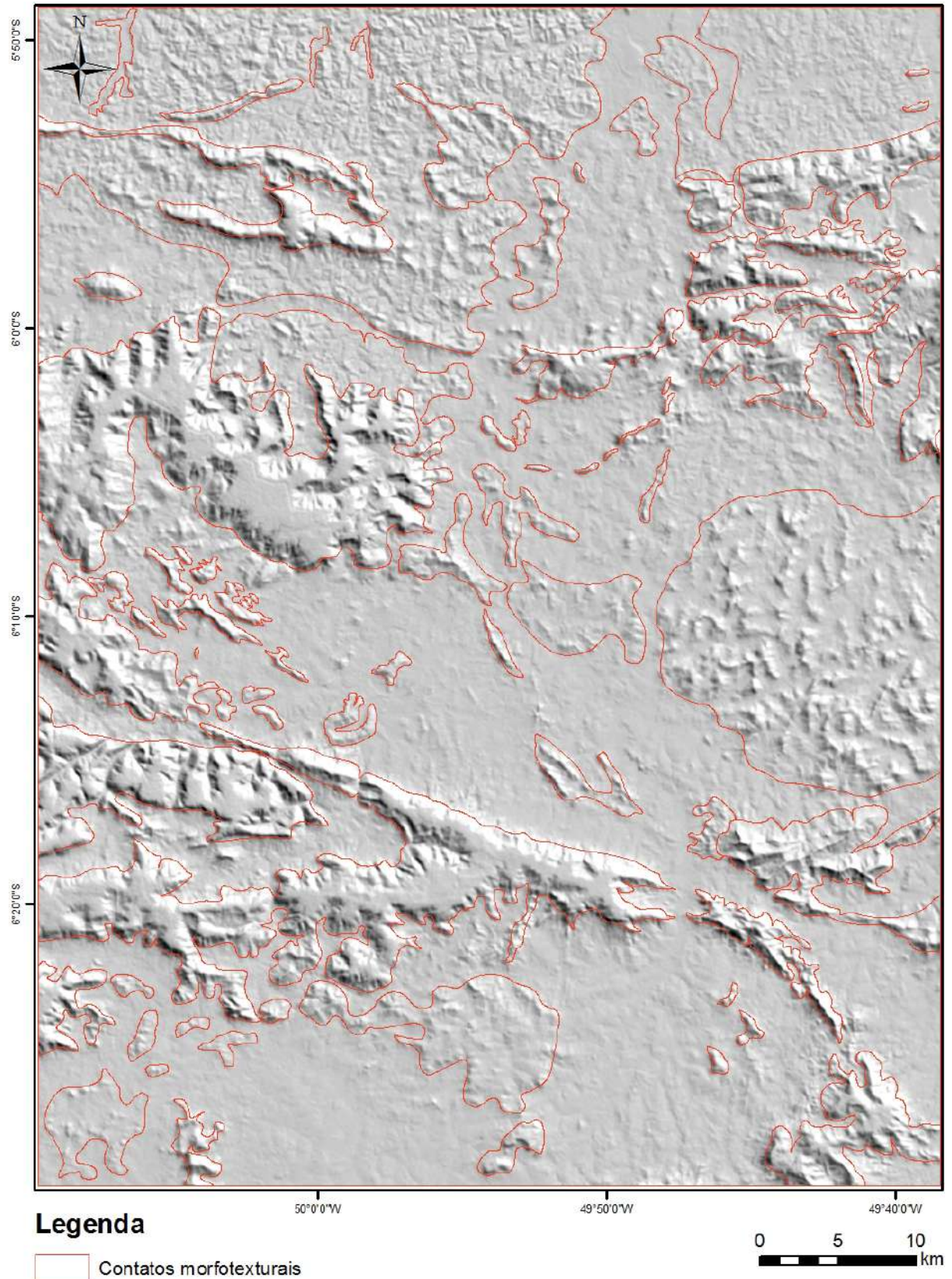


Figura 4.2: Imagem de sombreamento a azimute de 45° (principal direção estrutural), gerada a partir de modelo SRTM. Traços em vermelho indicam contatos entre quebras de morfologia de relevo e textura.

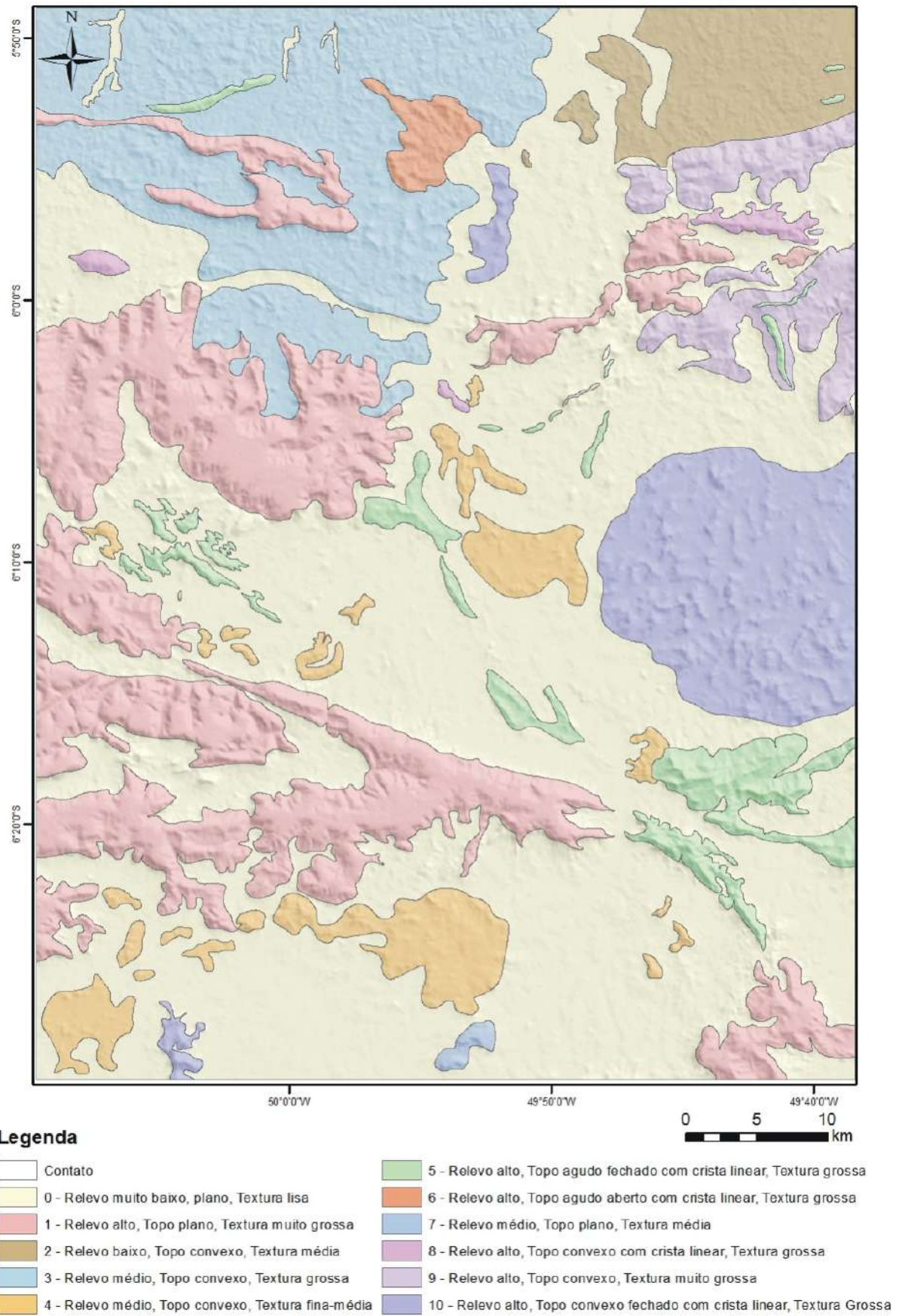


Figura 4.3: Mapa de unidades texturais (ID - Descrição).

Quadro 4.1: Variedade de texturas descritas sobre o modelo SRTM da área

ID	Relevo	Topo	Textura	Rugosidade
0	Relevo muito baixo	plano	Textura lisa	muito baixa rugosidade
1	Relevo alto	Topo plano	Textura muito grossa	alta rugosidade
2	Relevo baixo	Topo convexo	Textura média	rugoso
3	Relevo médio	Topo convexo	Textura grossa	alta rugosidade
4	Relevo médio	Topo convexo	Textura fina-média	baixa rugosidade
5	Relevo alto	Topo agudo fechado com crista linear	Textura grossa	alta rugosidade
6	Relevo alto	Topo agudo aberto com crista linear	Textura grossa	alta rugosidade
7	Relevo médio	Topo plano	Textura média	rugoso
8	Relevo alto	Topo convexo com crista linear	Textura grossa	alta rugosidade
9	Relevo alto	Topo convexo	Textura muito grossa	alta rugosidade
10	Relevo alto	Topo convexo fechado com crista linear	Textura Grossa	alta rugosidade

5 DISCUSSÃO

5.1 Integração de dados em SIG: Mapa-Litotextural

A integração dos dados em SIG (Sistema de Informação Geográfica) é uma etapa importante na confecção de qualquer mapa. Tendo como base informações oriundas da etapa de descrição de unidades texturais (mapa textural), podemos usar o conhecimento geológico ou simplesmente orientar nossa interpretação com base em mapas geológicos anteriormente elaborados em uma dada escala e assim sugerir associações textura-geologia produzindo assim um mapa lito-textural.

A confecção do mapa lito-textural desse trabalho foi orientada em parte pelo recorte do mapa geológico produzido por Lobato *et al.* (2002), englobando a área de estudo e pelas descrições morfotexturais (vide subitem 2.4.1, pag. 20). Da integração do SIG do mapa geológico e mapa textural foi gerada uma associação textura-litológia, resumida no quadro 5.1 (pag. 51). A integração desses dados pode ser observada na figura 5.1.

Quadro 5.1: Associação litologia-textura

ID	Textura	Associação Litológica
0	Relevo muito baixo, plano, Textura lisa	Aluviões; solos sobre relevo arrasado do embasamento, Complexo Xingu
1	Relevo alto, Topo plano, Textura muito grossa	Metassedimentos e vulcanicas. Supergrupo Itacaiunas
2	Relevo baixo, Topo convexo, Textura média	Embasamento, Complexo Xingu, maior ocorrência de metamáficas e metaultramáficas
3	Relevo médio, Topo convexo, Textura grossa	Embasamento, Complexo Xingu, maior ocorrência de gnaisses
4	Relevo médio, Topo convexo, Textura fina-média	Granitóides, gnaisses. Suite Plaquê-Granito Estrela
5	Relevo alto, Topo agudo fechado com crista linear, Textura grossa	Provavel controle estrutural: planos de falha silicificados
6	Relevo alto, Topo agudo aberto com crista linear, Textura grossa	Gnaisses / granito com maior controle estrutural
7	Relevo médio, Topo plano, Textura média	Rochas maficas-ultramaficas da Suite Catete (inclui corpo do Vermelho - Ni)
8	Relevo alto, Topo convexo com crista linear, Textura grossa	Metassedimentos ou metavulcanicas orientadas por charneira de dobra ou plano de falha
9	Relevo alto, Topo convexo, Textura muito grossa	Rochas vulcano-sedimentares com forte orientação por lineamentos ENE. Igarape Salobo
10	Relevo alto, Topo convexo fechado com crista linear, Textura Grossa	Rochas graníticas cortadas por diques e/ou falhas. Granitos Estrela e Cigano.

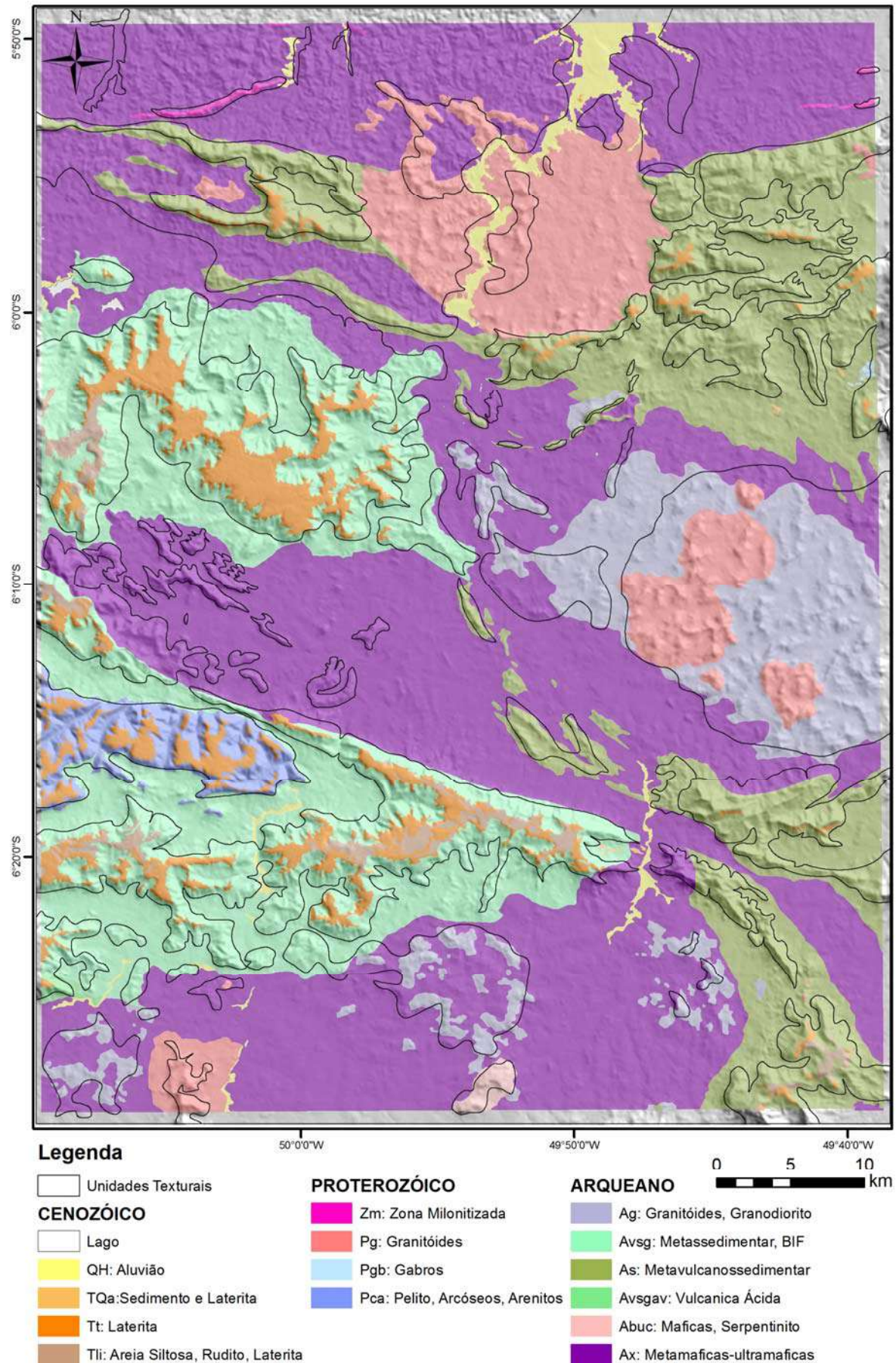


Figura 5.1: Mapa geológico Lobato *et al.* (2002) integrado em SIG com mapa de limites das unidades texturais.

5.2 Ambigüidades

As interpretações com base nas imagens de sombreamento apresentaram um resultado muito coerente com o mapa geológico, mas algumas considerações podem ser destacadas. Tal como na unidade 5 (ver tabela 5.1); o mapa geológico da área engloba essa unidade textural como parte do embasamento (metaultramáficas, metamáficas e gnaisses do Complexo Xingu). As características texturais desta unidade indicaram planos de falhas silicificados, mas sugere-se uma observação de campo mais detalhada, pois a porção desta unidade observada na parte oeste da área apresenta características, de acordo com Lima (1995), que levam a crer em uma interpretação de serras de quartzito. Isto é influenciado principalmente por sua posição imponente em meio a um relevo mais acidentado pela erosão além de outras características destacadas na figura 2.14.

Verificações em campo ainda precisam ser feitas na unidade 6 para conclusões mais precisas, pois esta se encontra em uma área limítrofe entre unidades do embasamento e unidades graníticas (unidades 3 e 10, respectivamente). Neste trabalho a unidade 6 foi interpretada como granitos ou gnaisses com forte controle estrutural. Dentro dessas possibilidades, caso as observações de campo indiquem granitos, é muito provável serem alocadas ao granito Cigano, caso contrário esta pode ser parte do embasamento.

A unidade 0, descrita como aluviões e solos sobre embasamento arrasado, apresenta uma textura lisa e próximo a uniformidade. Isso acontece muito provavelmente devido a intensa cobertura vegetal ocorrente nesta unidade, dificultando (radargraficamente) uma interpretação mais precisa visando separar porções de embasamento e porções de solo/aluvião. No mapa geológico toda essa unidade é inserida no embasamento (Complexo Xingu).

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As imagens produzidas a partir do sombreamento do modelo SRTM (devidamente pré-processado) puderam ser adequadamente interpretadas segundo métodos de radar e fotogeologia para litologia e estruturas em escala compatível com 1:50.000. Essas interpretações podem ser feitas em um curto intervalo de tempo e com dados encontrados gratuitamente na internet. Os resultados dessas interpretações provêm um ótimo planejamento, otimizando assim os trabalhos feitos em campo.

Recomenda-se a integração de dados de SRTM com outras imagens de radar (como imagens SIPAM) e/ou sensores de bandas óticas, isso é necessário para interpretações com maior escala de precisão dos resultados e podem ajudar na interpretação das unidades 0, 5 e 6 destacadas como interpretações ambíguas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, O.J.B. & MAIA, R.G.N. 1991. **Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás; Subprograma Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais; Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará.** DNPM/CPRM. Brasília, 136 p.
- BARROS C.E.M. 1997. **Petrologie et structure du Complexe Granitique Estrela (2.5 Ga) et de son encaissant metavolcano-sedimentaire (Province Metallifere de Carajás, Bresil).** Doctor thesis, UniversitS Henri Poincaré - Nancy 1, 316p.
- BEISIEGEL, V.R., Bernadelli, A.L., Drumond, M., Kuf, A.W., Tremaine, J.W. 1973. **Geomorfologia/Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás.** Rev. Bras. Geociências, 3:p215-242.
- BIZZI, L., Schobbenhaus, C., Gonçalves, J. H., Baars, F. J., Delgado, I. M. O., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Santos, J.O.S. 2001. Mapa geológico do Brasil. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: sistemas de informações geográficas – SIG. Mapas – Escala 1:2.500.000. CPRM, Brasília, registro digital. 4 CD-Rom.
- BROWDEN, L.W.; PRUIT, E.L. **Manuel of remote sensing; interpretation and applications**, Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry, 1975. 2v
- CGIAR: < <http://srtm.csi.cgiar.org/> > acessado em 30/05/2009
- COMPANIA VALE DO RIO DOCE, **Atualização dos recursos e reservas provadas e prováveis das minas N4 e N5.** (Relatório Interno - DNPM 852145/1976), Abril – 2004.
- CPRM, 2003 - **Geologia, tectônica, e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG** / organizadores, Luiz Augusto Bizzi, Carlos Schobbenhaus, Roberta Mary Vidotti, João Henrique Gonçalves – Brasília: *CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003.* 692p
- DNIT:<<http://www.dnit.gov.br/>> acessado em 1/07/2009
- DOCEGEO. 1988. **Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anexo Anais, 1-54.
- FARR, T. G., *et al.* (2007), **The Shuttle Radar Topography Mission**, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- FWTools – Open EV: <<http://openev.sourceforge.net/>>. Acessado em 01/07/2009
- HEADY, B. & LITTLE, J. **SRTM data processing status at NIMA.** CD de apresentação do National Imagery and mapping Agency – NIMA. Agosto de 2003.
- INPE: < <http://www.dpi.inpe.br/apresentacoes.php> >
- LIMA, M.I.C. **Introdução à interpretação radargráfica.** Série Manuais Técnicos em Geociências Nº 3 - IBGE, 1995.
- LOBATO, Lydia M. ; ROSIÈRE, Carlos Alberto ; BAARS, Franciscus Jacobus ; SEOANE, José Carlos Sícili ; SILVA, Rosaline Cristina Figueiredo . **Geologia da Província Mineral Carajás & Geologia dos Depósitos de Ferro.** Belo Horizonte: Dept. Geologia-IGC-UFMG, 2002 (Revisão Bibliográfica).
- LOBATO, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M. 2005. **A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás - Controle Estrutural e contexto na evolução metalogenética**

- da província.** In: J.O. Marini, E.T. Queiroz e B.W Ramos. *Caracterização em depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM-CT-Mineral/Finep-ADIMB, Brasília p. 21-92.
- MACAMBIRA J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. **Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca. Convênios Seplan/DOCEGEO/ UFPa e DNPM/DOCEGEO/UFPa**. Relatório Final. 150p. Inédito.
- MACAMBIRA, E. M. B. ; FERREIRA FILHO, Cesar Fonseca . Fracionamento magmático dos corpos máfico-ultramáfico da Suite Intrusiva Cateté – Sudeste do Pará. *In: Evandro Luiz Klein; Marcelo Lacerda Vasquez; Lúcia Travasso da Rosa Costa. (Org). Contribuições à Geologia da Amazônia*. 1 ed. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Nordeste, 2002, v.3, p 105-114
- MURA, J. C. 2000. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR.(INPE-8209-TDI/764)**. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24>>. Acesso em: 30 maio 2009. 159p.
- Nievergelt, Yves. **Splines in Single and Multivariable Calculus**. 1993. Lexington, MA: COMAP; UMAP: Module 718
- NOGUEIRA, A.C.R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R.V.L. 1995. **Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica**. Ciências da Terra, 7:p177-197.
- OLIVEIRA, Daniel. Bruno. Moreno, Roberta da Silva, Miranda, Diogo Justa. Ribeiro, Carolina da Silva. SEOANE, José Carlos Sícoli. Melo, Cláudio Limeira. **Elaboração de um mapa de lineamento estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM , em uma área ao norte do rio Doce, ES**. *In* Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009 *Anais XIV*, p. 4157-4163.
- RICHARDS, J.A.1993. **Remote sensing digital image analysis**. 2.ed. Springer-Verlag, Berlin, 281 p. Cap. 2: Error correction and registration of image data, p. 39-74.
- RIVEREAU, J.C. **Fotointerpretação**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 28(4): 157-75, 1970
- ROSIÈRE, C. A., Baars, F.J., Seoane, J. C. S, Lobato, L. M., da Silva, de Souza, L. L S. R. C. and Mendes, G. E. **Structure and iron mineralisation of the Carajás Province. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B) 2006 VOL 115 NO 4: p126-133.**
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., BAMLER, R. **The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar**. German Aerospace Center (DLR). 2002.
- SANTOS, J.O.S, Hartmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R. 2000. **A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology**. Gondwana Research, 3(4): p453-488.
- SANTOS, P. R. A., **Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM em diferentes escalas: um estudo de caso na Amazônia**. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
- SEOANE, J.C.S., BAARS, F.J., 2001. **Selecting exploration targets in the Carajás Mineral Province - a review of the geology deposits, models and current practices. consulting report**. Roots Rock Ltda., Belo Horizonte

SILVA, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G. 1974. **Geologia das Folhas SB.22-Araguaia e parte da Folha SC.22- Tocantins**. In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB.22 – Araguaia e parte da Folha SC.22 – Tocantins, DNPM Rio de Janeiro, (Levantamento de Recursos Naturais, 4).

SRTM: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> acessado em 01/07/2009

TASSINARI, C.C.G. *et al.* (2000). The Amazonian Craton. In: Cordani, U.G. *et al.* (ed.) **Tectonic Evolution of South America**, p. 41-96, Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, 856 p.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

VILLAS, R.N & SANTOS, M.D. 2001. Gold **deposits of the Carajás mineral province: deposit type and metallogenesis**. Mineralium Deposita, 36: p300-331.